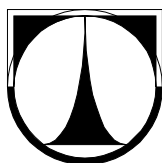


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: M 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika



Využití alternátoru jako pomocného pohonu spalovacího motoru

Utilization of alternator as an assistant drive of combustion engine

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor:

Petr Němec

Vedoucí diplomové práce:

Dr. Ing. Josef Dufek

Konzultant:

Prof. Ing. Aleš Richter, CSc.

V Liberci 19. 5. 2006

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 18. května 2006

.....

Petr Němec

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Dr. Ing. Josefu Dufkovi a konzultantovi Prof. Ing. Alešovi Richterovi, CSc. za jejich cenné rady a připomínky, které mi velmi pomohly při zpracování diplomové práce. Můj dík také patří celé rodině, která mě podporovala při studiu a poté i přátelům, díky kterým jsem na TU v Liberci strávil nezapomenutelných pět let.

Anotace

Diplomová práce se zabývá myšlenkou využití alternátoru Valeo 120A pracujícím v režimu synchronního motoru jako pomocného pohonu spalovacího motoru při otáčkách 800 min^{-1} až 2000 min^{-1} . V první části je práce zaměřena na získání základních technických parametrů, seznámení se s konstrukcí statoru a rotoru a proměření alternátoru jako zdroje el. energie, při různých otáčkách a rozdílných budících proudech. Na základě zjištěných údajů je sestaven matematický model. Následuje měření v režimu synchronního motoru a určení maximálního točivého momentu.

Annotation

The Diploma Thesis deals with an idea of an utilization of the alternator Valeo 120A working at the mode of synchronous motor as an assistant drive of the combustion engine by the revolution range from 800 min^{-1} to 2000 min^{-1} . The first part of this work is focused on obtaining the basic technical parameters, on familiarizing with the construction of stator and rotor and on measuring the alternator as source of electrical energy by different rotation speeds and by different driving currents. Mathematical model based on acquired data was built. Measurement at the mode of synchronous motor and a definition of maximal torque follow then.

OBSAH:

1. SEZNÁMENÍ SE S FUNKCÍ SYNCHRONNÍHO STROJE	12
1.1 Základní fyzikální představy o činnosti synchronního stroje	12
1.2 Spouštění synchronního motoru.....	14
1.3 Matematický model synchronního stroje.....	15
1.3.1 Obecný model.....	15
1.3.2 Náhradní schéma a vektorový diagram.....	18
1.4 Konstrukce synchronního stroje.....	19
1.4.1 Rotor.....	19
1.4.1.1 Stroje s hladkými rotory – turbostroje.....	19
1.4.1.2 Stroje s vyniklými póly	20
1.4.2 Stator	20
1.5 PWM modulace	21
2. SPECIFIKACE ALTERNÁTORU VALEO 120A	24
2.1 Rotor	24
2.2 Stator alternátoru Valeo 120A.....	25
2.3 Šesticestný usměrňovač	26
3. VLASTNÍ MĚŘENÍ	28
3.1 Příprava měření	28
3.2 Měření synchronního stroje jako alternátoru	29
3.3 Průběh výstupního napětí.....	30
3.4 Průběh výstupního napětí nezatíženého stroje	31
3.5 Průběh proudu při zkratu.....	32
3.6 Měření na zátěži	34
3.7 Měření na vozidle Octavia	36
4. MATEMATICKÝ POPIS SYNCHRONNÍHO STROJE JAKO MOTORU.....	38
4.1 Měření odporu	38
4.2 Měření indukčnosti.....	38
4.3 Náhradní schéma jedné fáze.....	40
5. MĚŘENÍ SYNCHRONNÍHO STROJE JAKO MOTORU	42
5.1 Příprava měření	42
5.2 Měření napájecího proudu při chodu naprázdno	43

5.3	Měření točivého momentu	44
6.	POSOUZENÍ EFEKTIVITY V DANÉM ROZSAHU OTÁČEK	47
	ZÁVĚR.....	49
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	50

Seznam použitých veličin

U_i	– indukované napětí na statorovém vinutí	[V]
B	– elektromagnetická indukce	[T]
I_b	– rotorový proud	[A]
Φ_b	– magnetický tok vyvolaný rotorovým proudem I_b	[Wb]
δ	– zátěžový úhel stroje	[°el]
l	– délka vodiče v magnetickém poli	[m]
v	– rychlost vodiče v magnetickém poli	[m.s ⁻²]
p	– počet pólových dvojic	[–]
n_s	– synchronní otáčky	[ot.min ⁻¹]
f	– vstupní frekvence	[Hz]
U_{bat}	– napětí baterie ve vozidle	[V]
R_r	– odpor rotoru	[Ω]
m_r	– hmotnost rotoru	[kg]
τ_p	– pólová rozteč	[–]
Q	– počet drážek statoru	[–]
σ	– proudové zatížení	[A.m ⁻²]
I_v	– proud v jedné cívce statorového vinutí	[A]
I_k	– proud nakrátko v jedné fázi statoru	[A]
I_d	– proud za usměrňovacími diodami	[A]
S_v	– průřez statorového vinutí	[m ²]
R_s	– odpor jedné fáze statorového vinutí	[Ω]
L_s	– vlastní indukčnost jedné fáze statorového vinutí	[H]
N_s	– počet závitů jedné fáze statorového vinutí	[–]

Seznam obrázků

- Obr. 1.1 Elektrické schéma zapojení synchronního motoru
- Obr. 1.2 Závislost momentu na zátěžném úhlu [4]
- Obr. 1.3 Momentová charakteristika synchronního motoru [4]
- Obr. 1.4 Zjednodušené nahrazení cívek statoru a rotoru [5]
- Obr. 1.5 Závislost vlastní indukčnosti statorového vinutí na poloze rotoru [5]
- Obr. 1.6 Náhradní schéma a vektorový diagram alternátoru [9]
- Obr. 1.7 Suboscilační modulace
- Obr. 1.8 Polovodičový frekvenční měnič
- Tab. 1.5.1 Možné kombinace spínání tranzistorů
- Tab. 1.5.2 Tabulka ztrátového výkonu na tranzistoru
- Obr. 2.1 Rozměry a uspořádání rotoru alternátoru
- Obr. 2.2 Rotor alternátoru
- Obr. 2.3 Stator synchronního stroje
- Obr. 2.4 Zapojení usměrňovače, střídače
- Obr. 3.1 Blokové schéma měření synchronního alternátoru
- Obr. 3.2 Nesymetrie uložení rotoru
- Graf 3.1 Výstupní napětí alternátoru
- Tab. 3.4.1 Hodnoty pro napětí naprázdno
- Graf 3.2 Průběh napětí naprázdno
- Tab. 3.5.1 Hodnoty zkratového proudu
- Graf 3.4 Průběh proudu nakrátko
- Tab. 3.6.1 Hodnoty získané při měření na odporové zátěži
- Graf 3.4 Závislost výstupního napětí na otáčkách
- Graf 3.5 Závislost výstupního proudu na otáčkách
- Graf 3.6 Závislost výkonu na otáčkách
- Tab. 4.1.1 Měření odporu
- Tab. 4.2.1 Parametry statorového vinutí
- Tab. 4.2.2 Závislost indukčnosti vinutí jedné fáze na pootočení rotoru
- Graf 4.1 Závislost indukčnosti vinutí jedné fáze na natočení rotoru
- Obr. 5.1 Náhradní schéma synchronního motoru
- Obr. 5.2 Blokové schéma měření synchronního motoru
- Tab. 5.2.1 Odběr proudu při chodu naprázdno

Graf 5.1 Odběr proudu při chodu naprázdno

Obr. 5.3 Soustava pro měření momentu

Tab. 5.3.1 Měření točivého momentu

Graf 5.2 Závislost momentu na otáčkách

Obr. 6.1 Demontovaný synchronní stroj

Úvod

Automobilový průmysl je jedním z velmi rychle se vyvíjejících odvětví, s čímž je spojena i rivalita a konkurence mezi jednotlivými výrobci vozidel. Proto se výrobci snaží co nejvíce zdokonalovat jednotlivé komponenty a popřípadě uvažují o jejich dalším využití. Na takovéto myšlence je založena i tato diplomová práce. Jedná se o využívání automobilového alternátoru jako pomocného pohonu. Stroj by byl zapojen jako synchronní motor a jeho točivý moment by se přičítal k momentu motoru. Zvýšeného momentu by vozidlo využívalo hlavně při nízkých otáčkách motoru v rozsahu 800 min^{-1} až 2000 min^{-1} , kdy je jeho točivý moment nejnižší. Tato práce se však nezabývá vývojem elektrického stroje, který by pro toto řešení byl optimální, ale zjišťuje, zda by se mohl použít klasický sériově vyráběný alternátor. Podmínkou je, aby se neměnila konstrukce ani umístění alternátoru ve vozidle.

K tomu abychom porozuměli funkci synchronního stroje je věnována první část práce. Zde je popsán základní fyzikální princip a obecná teorie matematického modelu stroje. K plynulému řízení otáček je použit frekvenční měnič využívající pulzně šířkovou modulaci, která je zde také popsána.

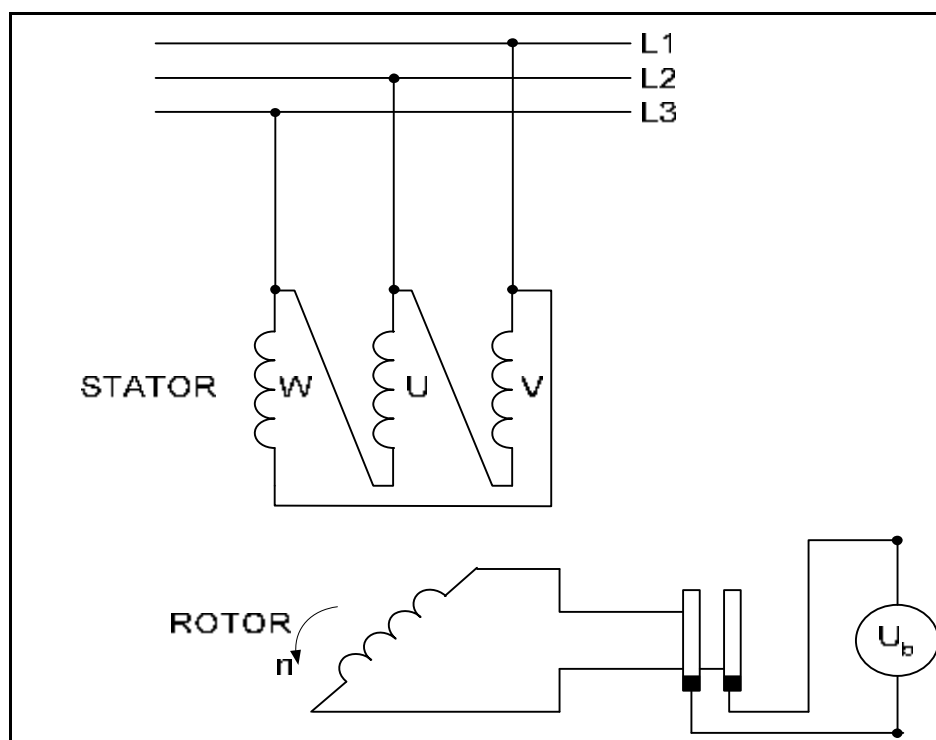
V praktické části se práce věnuje proměření alternátoru jako zdroje elektrické energie, abychom získali základní představu o tomto stroji. Dá se předpokládat, že účinnost stroje při přeměně mechanické energie na elektrickou by měla být podobná účinnosti při přeměně elektrické energie na mechanickou. Pro změření synchronního stroje jako motoru bude stroj připojen k zařízení umožňující změření točivého momentu.

1. SEZNÁMENÍ SE S FUNKCÍ SYNCHRONNÍHO STROJE

Synchronní stroj je elektrický točivý stroj, jehož kmitočet svorkového napětí je přímo úměrný otáčkám. Jeho rotor se otáčí současně s točivým magnetickým polem statoru. Synchronní stroj pracuje jako synchronní motor nebo synchronní alternátor.

1.1 Základní fyzikální představy o činnosti synchronního stroje

Při chodu synchronního stroje jsou proudy vinutími periodické funkce času. Díky vzájemnému fázovému posuvu proudů a vzájemnému geometrickému posuvu vinutí se reakční pole statorových vinutí periodicky otáčí podél vzduchové mezery. Nemusí se jednat o rovnoměrný pohyb, pole se může pohybovat skokově, navíc během času může měnit svůj okamžitý průběh podél mezery a svou maximální velikost – záleží na rozložení vinutí a na průběhu fázových proudů. V každém případě ovšem periodicky rotuje magnetická osa tohoto pole podél vzduchové mezery a jedná se tedy o točivé pole.



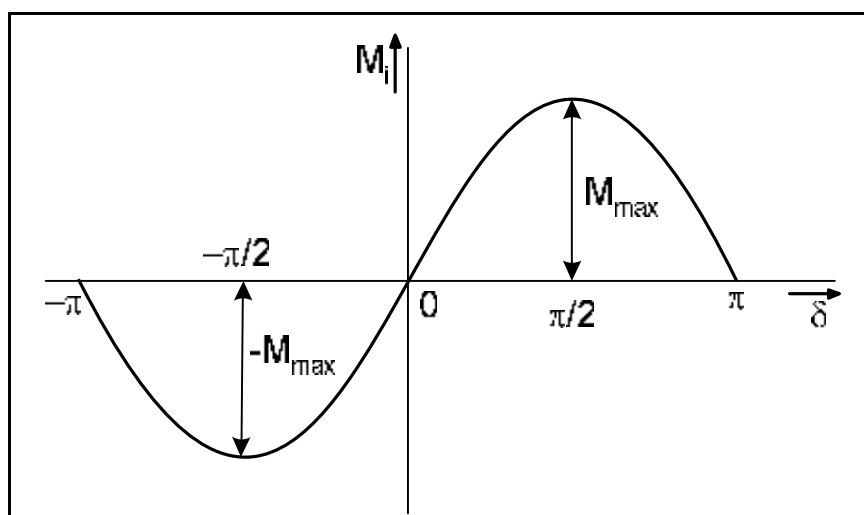
Obr. 1.1 Elektrické schéma zapojení synchronního motoru

Ve vodiči v drážce statoru se indukuje napětí o velikosti :

$$U_i = B.l.v \quad (1.1.1)$$

Velikost indukovaného napětí U_i v jednotlivých fázích je funkcí magnetického toku Φ_b vybuzeného rotorovým proudem I_b .

Díky shodnosti periody měnicích se fázových proudů s dobou, během níž se rotor pootočí o 360° el je zaručeno, že točivé pole statoru rotuje stejnou rychlostí (synchronně) s rotujícím budícím polem rotorového vinutí. Mezi magnetickou osou reakčního pole a magnetickou osou pole rotoru je úhlový posuv, který se nazývá zátěžný úhel stroje δ .



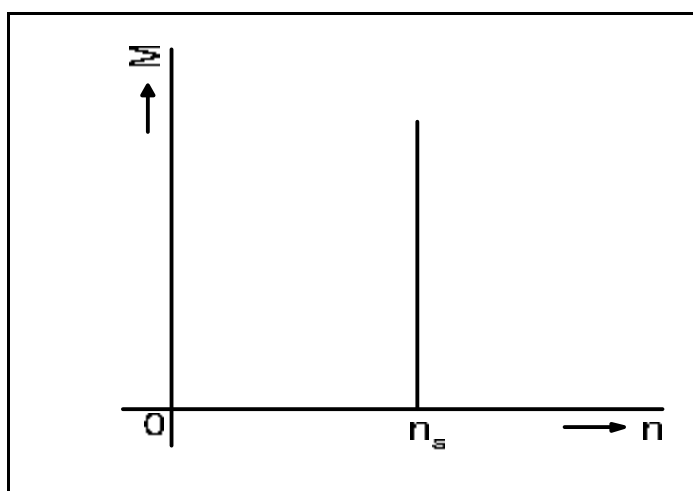
Obr. 1.2 Závislost momentu na zátěžném úhlu[4]

Zátěžný úhel δ závisí na fázi budících proudů vůči poloze rotoru, (tj. přesněji řečeno vůči indukovanému napětí, jehož průběh je s polohou rotoru pevně spjat). Dále závisí na zatěžovacím momentu stroje. Stabilní provoz je v rozmezí zátěžného úhlu $-\pi/2 < \delta < \pi/2$, kde záporná mez je pro generátor a kladná pro motor. Po překročení maximálního momentu M_{max} motor vypadne ze synchronizace, zastaví se a musí být okamžitě odpojen od zdroje.

1.2 Spouštění synchronního motoru

Jak vyplývá z momentové charakteristiky synchronního motoru na obr. 1.3, vyvíjí motor moment $M > 0$ pouze při synchronních otáčkách. Proto nastává problém při spouštění těchto motorů, kdy motor musí dosáhnout synchronních otáček n_s .

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (1.1.2)$$



Obr. 1.3 Momentová charakteristika synchronního motoru[4]

Při rozběhu synchronního motoru se nejčastěji používá :

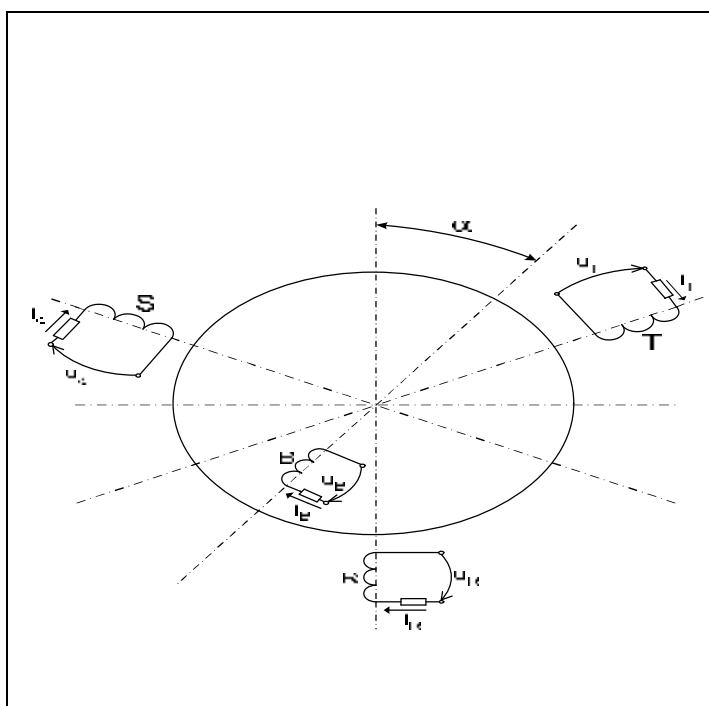
- a) Rozběhový motor – obvykle asynchronní, roztočí nezatížený synchronní stroj na otáčky blízké synchronním otáčkám. Při těchto otáčkách se vybudí cívka rotoru synchronního motoru a motor je vtažen to synchronizmu. Poté se rozběhový motor se může odpojit.
- b) Asynchronní rozběh – nejčastěji pomocí tlumicího vinutí, které funguje jako klec asynchronního motoru s kotvou na krátko. Motor se rozběhne jako asynchronní na otáčky blízké synchronním, poté je nabuzen rotor a motor je vtažen do synchronizmu.
- c) Frekvenční rozběh – zde je použit polovodičový frekvenční měnič s proudovým nebo napěťovým meziobvodem. Motor je roztočen pomocí postupně se zvyšujících frekvencí polovodičového frekvenčního měniče. Tento způsob je použit pro praktické řešení této diplomové práce.

1.3 Matematický model synchronního stroje

1.3.1 Obecný model

Matematický popis bude vysvětlen na dvoupólovém synchronním stroji s vyjádřenými póly. Každý fázový svazek statorového vinutí je nahrazen pouze jednou cívkou. Vzniklé tři cívky R, S, T, jsou souměrně umístěny po obvodu statoru tzn. svírají mezi sebou úhel 120° . Nahrazení jednou cívkou bude provedeno také u rotorového (budícího) vinutí B. Nahrazení vinutí je na obr. 1.4. Pro zjednodušení je předpokládáno že:

- Ø magnetický obvod stroje je lineární (zanedbáme vliv sycení).
- Ø stroj nemá tlumící vinutí (amortizér)
- Ø zanedbáme vliv drážkování statoru



Obr. 1.4 Zjednodušené nahrazení cívek statoru a rotoru[5]

Pro každé vinutí lze sestavit následující rovnice :

$$\begin{aligned}
 u_S &= -R i_S - \frac{d\Phi_S}{dt} & u_R &= -R i_R - \frac{d\Phi_R}{dt} \\
 u_B &= R_B i_B + \frac{d\Phi_B}{dt} & u_T &= -R i_T - \frac{d\Phi_T}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{1.3.1}$$

kde:

u_R, u_S, u_T indukované natěti ve fázích R, S, T
 i_R, i_S, i_T proudy ve fázích R, S, T
 $\Phi_R, \Phi_S, \Phi_T, \Phi_B$ cívkový tok vinutí fází statoru, resp. rotoru
 R, R_B odpor vinutí fáze R, S, T, resp. rotoru
 u_B napětí přivedené na rotorové vinutí
 i_B rotorový proud

Cívkové toky vyjadřují následující rovnice :

$$\begin{aligned}
 \Phi_R &= L_R i_R + L_{RS} i_S + L_{RT} i_T + L_{RB} i_B \\
 \Phi_S &= L_{SR} i_R + L_S i_S + L_{ST} i_T + L_{SB} i_B \\
 \Phi_T &= L_{TR} i_R + L_{TS} i_S + L_T i_T + L_{TB} i_B \\
 \Phi_B &= L_{BR} i_R + L_{BS} i_S + L_{BT} i_T + L_B i_B
 \end{aligned} \tag{1.3.2}$$

kde:

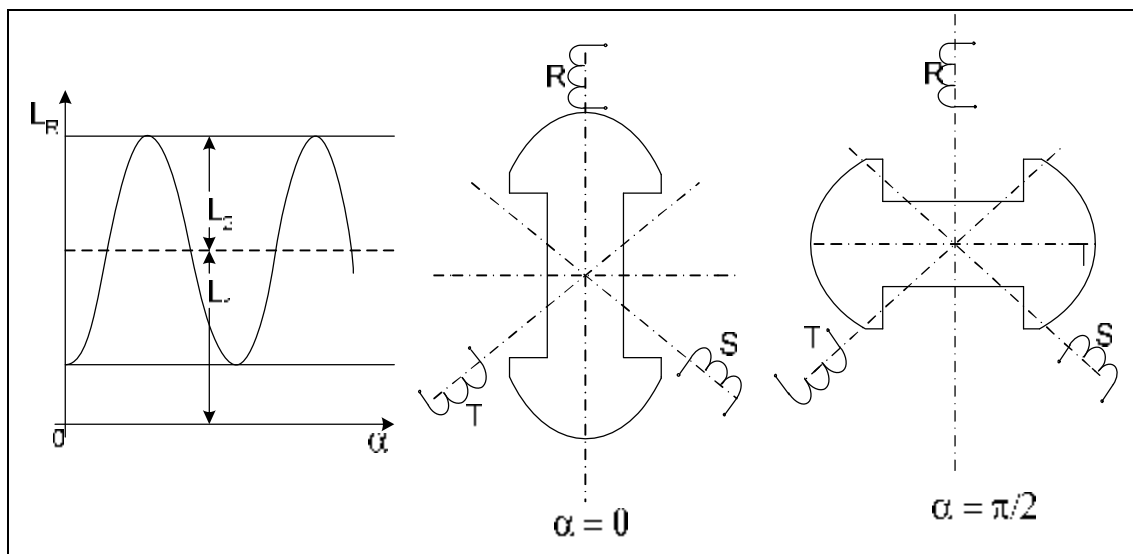
L_R, L_S, L_T, L_B vlastní indukčnost vinutí R, S, T, B
 L_{SR}, L_{ST} , atd. vzájemná indukčnost vinutí

Komplikace nastává při řešení diferenciálních rovnic (1.3.1), protože se jedná o typ s proměnnými koeficienty. Vlastní a vzájemné indukčnosti se mění v čase. Tato proměnnost je způsobena změnou polohy rotoru s vyjádřenými póly vůči osám statorových vinutí, při které se mění reluktance magnetických obvodů jednotlivých vinutí. U stroje s hladkým rotorem se reluktance v čase nemění. Vlastní i vzájemná indukčnost je konstantní a v následujících vzorcích by pro stroj s hladkým rotorem platilo $L_2=0$.

Pozornost bude věnována změně indukce pouze v jedné fázi statorového vinutí např. R. Jestliže se otáčí rotor konstantní rychlostí, je změna vlastní indukčnosti periodická. Maximální hodnoty dosahuje, když je osa rotoru shodná s osou vinutí R, tedy $\alpha = 0$ (magnetická vodivost je největší), naopak minimální je, když tyto dvě osy svírají úhel $\alpha = \pi/2$. Magnetická vodivost se mění s periodou rovnou jedné pólové rozteči.

Vlastní indukčnost satorového vinutí:

$$\begin{aligned}
 L_R &= L_1 + L_2 \cos 2a \\
 L_S &= L_1 + L_2 \cos 2\left(a - \frac{2p}{3}\right) \\
 L_T &= L_1 + L_2 \cos 2\left(a + \frac{3p}{3}\right)
 \end{aligned} \quad (1.3.3)$$



Obr. 1.5 Závislost vlastní indukčnosti satorového vinutí na poloze rotoru[5]

Vzájemná indukčnost satorových vinutí má obdobný periodický průběh jako vlastní indukčnost, ale je posunuta o $\pi/2$. L_{ST} nabývá maximální hodnoty při $\alpha=\pi/2$ (úhel mezi osou rotorového vinutí a osou satorového vinutí R) a minimální hodnoty pro $\alpha=0$. Při kladném smyslu proudu i_s je spřažený magnetický tok Φ_{ST} záporný, tedy i vzájemné indukčnosti jsou záporné:

$$\begin{aligned}
 -L_{ST} &= -L_{TS} = L_3 - L_2 \cos 2a \\
 -L_{TR} &= -L_{RT} = L_3 - L_2 \cos 2\left(a - \frac{2p}{3}\right) \\
 -L_{RS} &= -L_{SR} = L_3 - L_2 \cos 2\left(a + \frac{2p}{3}\right)
 \end{aligned} \quad (1.3.4)$$

Vlastní indukčnost vinutí rotoru se nemění: $L_B = L_4 = konst.$

Vzájemná indukčnost statorového a rotorového vinutí L_{BR} dosahuje maxima při $\alpha=0$ a je nulová když jsou osy statorového vinutí R a rotorového vinutí B na sebe kolmé ($\alpha=\pi/2$). Potom platí :

$$\begin{aligned} L_{BR} &= L_{RB} = L_5 \cos a \\ L_{BS} &= L_{SB} = L_5 \cos\left(a - \frac{2p}{3}\right) \\ L_{BT} &= L_{TB} = L_5 \cos\left(a + \frac{2p}{3}\right) \end{aligned} \quad (1.3.5)$$

Jestliže nejsou otáčky motoru konstantní $w = \frac{da}{dt} \neq 0$ je potřeba kromě obvodových rovnic (1.3.1) uvažovat i rovnici mechanickou:

$$J \frac{d^2 a}{dt^2} + T_0 \frac{da}{dt} + T_e = 0 \quad (1.3.6)$$

kde:

J ...moment setrvačnosti rotoru [kg m^2]

T_0 ...moment tlumení (způsobený např. vířivými proudy) [Nm]

T_e ...elektromagnetický moment plus elektromagnetické ztráty stroje [Nm]

Je patrné, že k popisu synchronního stroje je zapotřebí pět lineárních diferenciálních rovnic (1.3.1) a (1.3.6). Komplikace nastává u rovnic pro statorové fáze R, S, T, kde se objevují periodicky proměnné koeficienty. Řešení těchto rovnic není triviální a používá se transformace do jiných souřadnic, tak, aby její koeficienty byly konstantní (např. Parkova transformace)

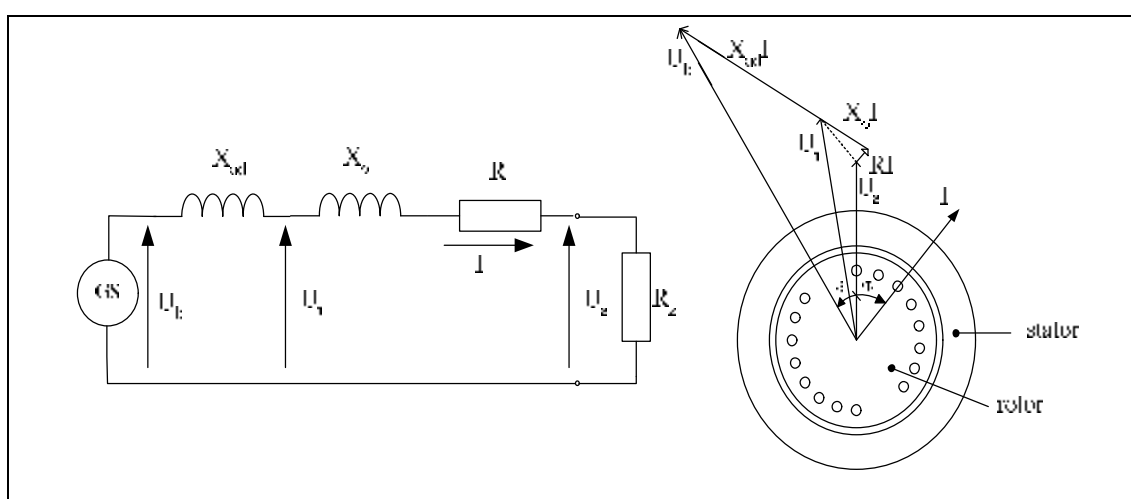
1.3.2 Náhradní schéma a vektorový diagram

Chování stroje v ustáleném stavu lze dobře sledovat na vektorovém diagramu, který vychází z náhradního schématu. Předpokládá se, že zatížení je souměrné, reaktance jsou konstanty a magnetický odpor je ve všech místech vzduchové mezery stejný. Potom se náhradní schéma, jak je vidět na obr. 1.6, kreslí pouze pro jednu fázi. Zanedbáme vyšší harmonické a ztráty v železe.

Alternátor si můžeme představit jako ideální generátor GS a odporů X_{ad} , X_{σ} , R . Podle náhradního schématu platí:

$$U_s = U_b + j(X_{ad} + X_{\sigma})I + RI \quad (1.3.7)$$

Napětí U_b se indukuje ve statorovém vinutí. V obvodu dochází k úbytkům napětí na činném odporu vinutí R , na reaktanci cívky X_{ad} a na rozptylové reaktanci X_{σ} . Ideální alternátor by neměl žádné odpory, žádné rozptyly a žádnou reakci statorového vinutí. Schémata alternátoru i motoru jsou shodná, pouze proud teče opačným směrem.



Obr. 1.6 Náhradní schéma a vektorový diagram alternátoru[9]

1.4 Konstrukce synchronního stroje

Synchronní stroj se skládá ze statoru a rotoru, které jsou sesazeny a umístěny do pláště alternátoru.

1.4.1 Rotor

U synchronních strojů dělíme rotory na dva základní typy, a to na rotory hladké a na rotory s vyniklými póly.

1.4.1.1 Stroje s hladkými rotory – turbostroje

Hladké rotory se používají u turbostrojů a mívají jednu, maximálně dvě, pólové dvojice. Celé (včetně hřídele) jsou vykovány z jednoho kusu oceli. Pro založení vinutí

jsou ve válcovém tělese rotoru vyfrézovány podélné drážky. Vzduchová mezera je po celém obvodu konstantní a bývá přibližně $0,02D$. Průměr dvoupólového turbogenerátoru může být max. 1200mm a délka max. 7000mm a to hlavně z důvodu odstředivých sil a kritických otáček. Turbostroje se používají výhradně jako generátory pro výrobu střídavé elektrické energie.

1.4.1.2 Stroje s vyniklými póly

Tyto rotory se vyrábějí s dvou nebo více pólovými dvojicemi. Používají se u motorů pro nejrůznější otáčky. Na hřídel je nasazené lité nebo kované jho, a to přímo a nebo prostřednictvím rotorové hvězdice, která je svařená se jhem a nábojem. Na jhu jsou připevněny vyniklé póly zpravidla lité nebo kované. Vinutí pólů je soustředné a nerozložené do drážek, proto by měl být prostorový průběh magnetomotorického napětí obdélníkový. Aby se průběh indukce co nejvíce podobal sinusovému průběhu je voleno vhodné pólové krytí (poměr šířky nástavce k pólové rozteči, který bývá $2/3$).

Přívod budícího proudu u obou strojů je realizován pomocí dvou izolovaných kroužků nejčastěji bronzových nebo železných, které jsou nalisovány na hřídeli rotoru a propojeny s budícím vinutím. Na tyto kroužky jsou přitlačovány uhlíkové kartáče. Pro ocelové kroužky se používají výhradně kartáče z přírodního grafitu.

1.4.2 Stator

Stator je tvořen nosnou kóstrou, do které je vloženo aktivní železo. Aktivní železo statoru je složeno z dynamoplechů, které jsou od sebe vzájemně izolovány lakováním nebo fosfátováním. Hlavním důvodem tohoto uspořádání je potlačení ztráty způsobené vířivými proudy, které vznikají ve vodivých materiálech vložených do střídavého elektrického pole. Na vnitřním obvodu plechů jsou vytvořeny drážky, do kterých se vkládá statorové vinutí.

Vinutí je rozděleno tak, že v každé pólové rozteči jsou tři skupiny cívek následujících za sebou a náležejících jednotlivým fázím.

Na základě znalosti rotoru a statoru můžeme definovat některé základní pojmy: Pólová rozteč τ_p , vyjadřuje počet drážek statoru Q na jeden pól rotoru:

$$t_p = \frac{Q}{2p} \quad (1.4.2.1)$$

p ...počet pólových dvojic

V každé pólové rozteči jsou zastoupeny všechny tři fáze. Poté na jeden pól a fázi připadá právě q drážek

$$q = \frac{Q}{2mp} \quad (1.4.2.2)$$

m je počet fází

Důležitým parametrem alternátoru je proudové zatížení σ statorového vinutí

$$s = \frac{I_v}{S_v} \quad (1.4.2.3)$$

I_vproud ve vinutí

E_v ...průřez vinutí

1.5 PWM modulace

PWM (Pulse – width modulation) je nejčastěji používaný způsob řízení motorů. Při této modulaci dochází k rychlému spínání tranzistorů, které je dáno maximálním spínacím kmitočtem polovodičových součástek (výkonové tranzistory 10^3 až 10^4 Hz, GTO tyristory nebo rychlé tyristory s vypínacími obvody 10^2 až 10^3 Hz). Frekvence spínání tranzistorů je několikrát vyšší než frekvence výstupního signálu. Potom lze předpokládat, že do jedné amplitudy výstupního signálu se vejde několik amplitud obdélníkového průběhu. Poměr kladné a záporné plochy v každé periodě nám udává střední hodnotu napětí každého obdélníka. Propojením těchto středních hodnot lze složit libovolný průběh napětí, u motorů je snaha aby se průběh co nejvíce blížil k sinusovému průběhu. Způsoby modulace lze rozdělit na dvě skupiny:

§ dopředné

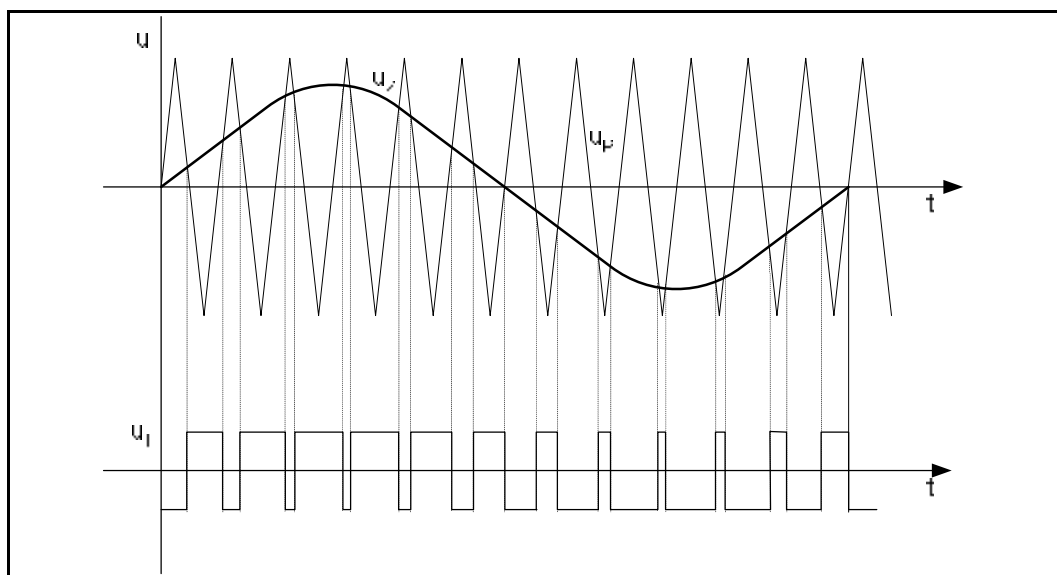
- suboscilační metoda
- modulace prostorového vektoru
- synchronizovaná modulace

§ zpětnovazební

- hysterézní proudová
- suboscilační metoda
- regulace proudového prostorového vektoru
- přímé řízení toku, momentu

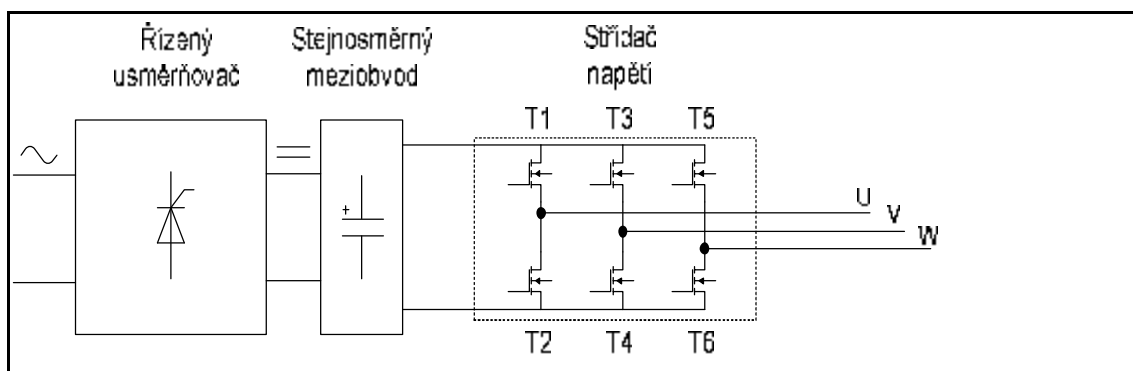
Nejznámější způsob je suboscilační metoda znázorněná na obr. 1.7, kdy se požadovaný průběh u_z komparuje s pilovitým signálem u_p o frekvenci dané parametry spínacích

prvků. Při rovnosti těchto dvou signálů dochází k sepnutí, resp. rozepnutí, konkrétního tranzistoru ovládaného napětím u_T .



Obr. 1.7 Suboscilační modulace

U stejnosměrných motorů se používají pulzní měniče. U motorů stejnosměrných, ať už synchronních nebo asynchronních, tuto modulaci zajišťuje polovodičový frekvenční měnič, který se skládá ze tří hlavních částí, zobrazených na obrázku 1.8, a to řízeného usměrňovače, napěťového nebo proudového meziobvodu a třífázového střídače napětí.



Obr. 1.8 Polovodičový frekvenční měnič

Dále bude popsán střídač napětí, pro který bude předpokládáno konstantní napětí stejnosměrného meziobvodu (pozn. u akumulátorových vozidel a u pohonu pracujících na stejnosměrné síti je střídač napájen přímo stejnosměrným napětím). Při spínání tranzistorů musí být dodrženy dvě základní pravidla:

1. Nikdy nesmí nastat společné sepnutí dvou tranzistorů připojených na jednu výstupní fázi např. T1 a T2. Kdyby tomuto sepnutí došlo, znamenalo by to zkrat stejnosměrného meziobvodu bez jakéhokoliv omezení zkratového proudu. To znamená, že můžeme vytvořit maximálně $2^3 = 8$ různých kombinací sepnutí, které jsou sestaveny do tabulky 1.5.1. Pro přehlednost je použito značení + a – pro připojení tranzistoru k odpovídajícímu potenciálu a 0 pro vypnutý tranzistor. Poslední dvě kombinace znamenají, že všechny tři fáze jsou připojeny na stejný potenciál, tzn. motor je v klidu. Ostatních šest kombinací odpovídá různým připojením zátěže na zdroj.

Tab.1.5.1 Možné kombinace spínání tranzistorů

	1	2	3	4	5	6	7	8
T1	+	+	+	0	0	0	+	0
T2	0	0	0	-	-	-	0	-
T3	0	0	+	+	+	0	+	0
T4	-	-	0	0	0	-	0	-
T5	+	0	0	0	+	+	+	0
T6	0	-	-	-	0	0	0	-

2. Tranzistory musí pracovat pouze v režimu zapnuto – vypnuto, nikdy nesmí být jen částečně otevřeny. Tato podmínka vychází z okamžitého ztrátového výkonu $p_z(t)$, který vzniká na tranzistorech dle vztahu:

$$p_z(t) = i(t) \cdot u(t) \quad (1.5.1)$$

Jak je ze vztahu patrné, může být minimálního ztrátového výkonu dosaženo pouze tehdy, když se proud nebo napětí blíží k nule, extrémy těchto hodnot jsou v tabulce 1.5.2

Tab.1.5.2 Tabulka ztrátového výkonu na tranzistoru

Režim tranzistoru	$u(t)$ [V]	$i(t)$ [A]	$p(t)$ [W]
vypnuto	max	0	0
zapnuto	min	max	min

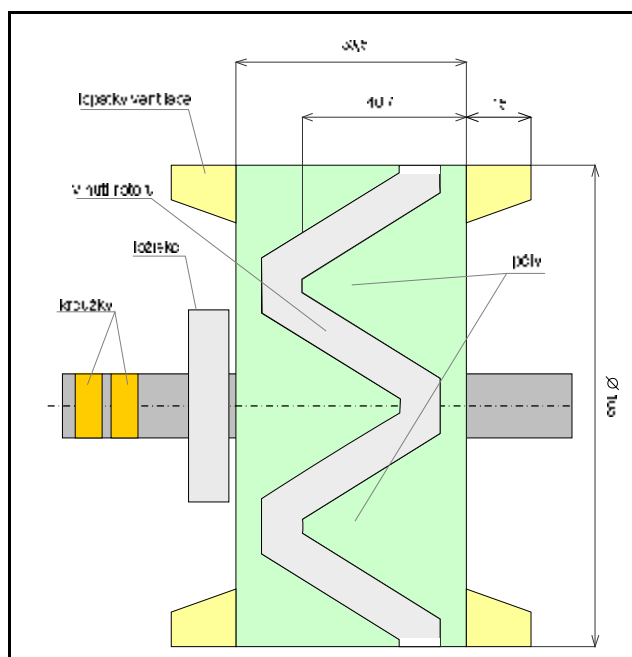
2. SPECIFIKACE ALTERNÁTORU VALEO 120A

2.1 Rotor

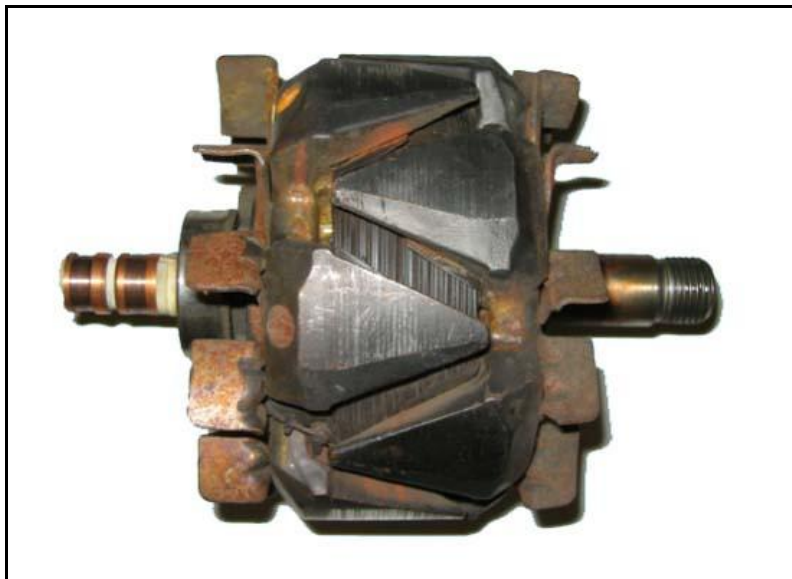
U tohoto alternátoru je použit rotor s vyniklými litými póly. Alternátor je tvořen dvěma hvězdnicemi se šesti trojúhelníkovými póly, mezi kterými je jho s budícím vinutím. Tyto hvězdice jsou sesazeny proti sobě tak, aby po obvodu tvořily dvanáct pólů neboli šest pólových dvojic. Schéma rotoru je na obr.2.1 a na obr.2.2 je skutečný vzhled rotoru. Z podílu obvodu rotoru a z počtu pólů je stanovena předpokládaná šířka jednoho pólu, která je v tomto případě rovna 27,5mm. Měření však ukázalo, že šířka základny trojúhelníkového pólu je 31mm, z čehož je patrné, že se póly překrývají. Jestliže bude tento stroj využíván na výrobu elektrické energie, kde není třeba kvalitní sinusový průběh napětí, lze tento rotor využívat. Pokud ale bude tento stroj použit jako motor, je zřejmé, že tvar a překrytí pólů není právě ideální. Dle vztahu (1.2.1) lze určit synchronní otáčky při frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$, které jsou $n_s = 500 \text{ ot/min}$.

Parametry rotoru

Odpor rotoru:	$R_r = 3,15 \Omega$
Indukčnost cívky rotoru:	$L_r = 232 \text{ mH}$
Maximální budící proud:	$I_b = U_{dat} / R_r = 12 / 3,15 = 3,8 \text{ A}$
Hmotnost rotoru:	$m_r = 2,9 \text{ kg}$



Obr. 2.1 Rozměry a uspořádání rotoru alternátoru



Obr. 2.2 Rotor alternátoru

2.2 Stator alternátoru Valeo 120A

Vinutí je tvořeno zdvojeným měděným drátem o průměru 1 mm. Počet závitů každé fáze je $N_s = 5$. Třífázové vinutí je zapojeno do trojúhelníka. Toto zapojení je voleno proto, aby při větším odběru proudu bylo vinutí proudově méně namáhané než by tomu bylo u zapojení do hvězdy. Po vnitřním obvodu statoru je v aktivním železe 36 drážek a dle vztahu (1.4.2.1) lze určit pólovou rozteč $\tau_p = 3$. Z pólové rozteče je poté dopočítán dle (1.4.2.2) počet drážek na jeden pól a fázi $q = 1$, což je naprosté minimum a u většiny kvalitnějších strojů se volí $q = 1,5$. Rozměry statoru jsou znázorněny na obr. 2.3.

I když je na štítku alternátoru označení 120A, není tato hodnota příliš směrodatná a zřejmě značí hodnotu jakéhosi krátkodobého proudového odběru. Při provedeném měření nakrátko byl zjištěn maximální efektivní zkratový proud $I_z = 49A$ přímo na výstupu vinutí, tzn. že byl odpojen usměrňovač (viz. kap. 2.3). Jelikož se jedná o zapojení do trojúhelníku, lze určit proud jedním vinutím I_v :

$$I_v = \frac{I_z}{\sqrt{3}} \quad (2.2.1)$$

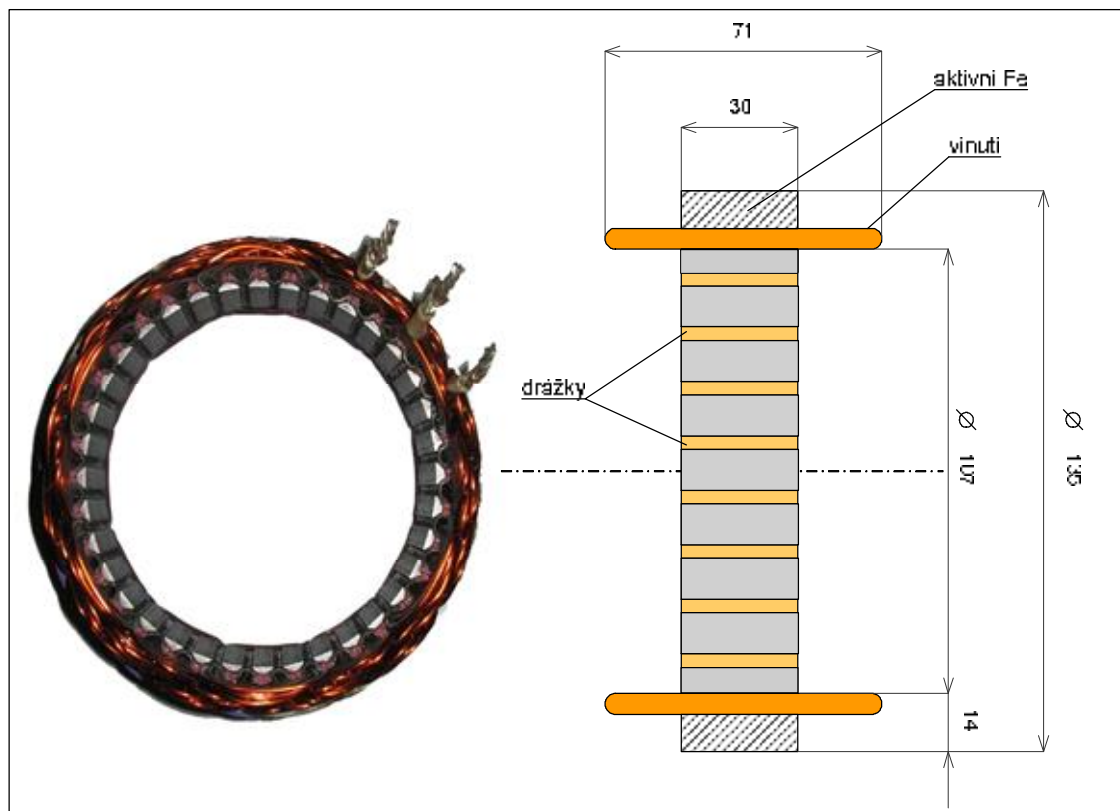
kdy $I_v = 28,3A$. Dále je tento proud dosazen do vztahu (1.4.2.3) a spočítáno proudové zatížení ve vinutí jedné fáze $\sigma = 18 A \cdot mm^{-2}$. Hodnota zatížení je dosti vysoká, ale je nutné dodat, že je pouze chvilková.

Parametry jedné fáze statorového vinutí :

Odpor vinutí: $R_s = 0,05 \, \Omega$

Vlastní indukčnost vinutí: $L_s = 273 \, \mu\text{H}$

Počet závitů : $N_s = 5$



Obr. 2.3 Stator synchronního stroje

2.3 Šesticestný usměrňovač

Statorové vinutí je připojeno na polovodičový neřízený šesticestný usměrňovač, který mění generované střídavé napětí na stejnosměrné. Šířka proudového impulsu diodou je 120° . Použitý usměrňovač dokáže zajistit pouze jednocestný tok energie, a to z alternátoru do baterie (resp. do spotřebičů ve vozidle). Pro funkci alternátoru jako motoru musí být zajištěn tok energie v obou směrech. Napájení synchronního motoru je realizováno pomocí polovodičového můstkového střídače napětí, spínání tranzistorů lze realizovat pomocí PWM modulace.

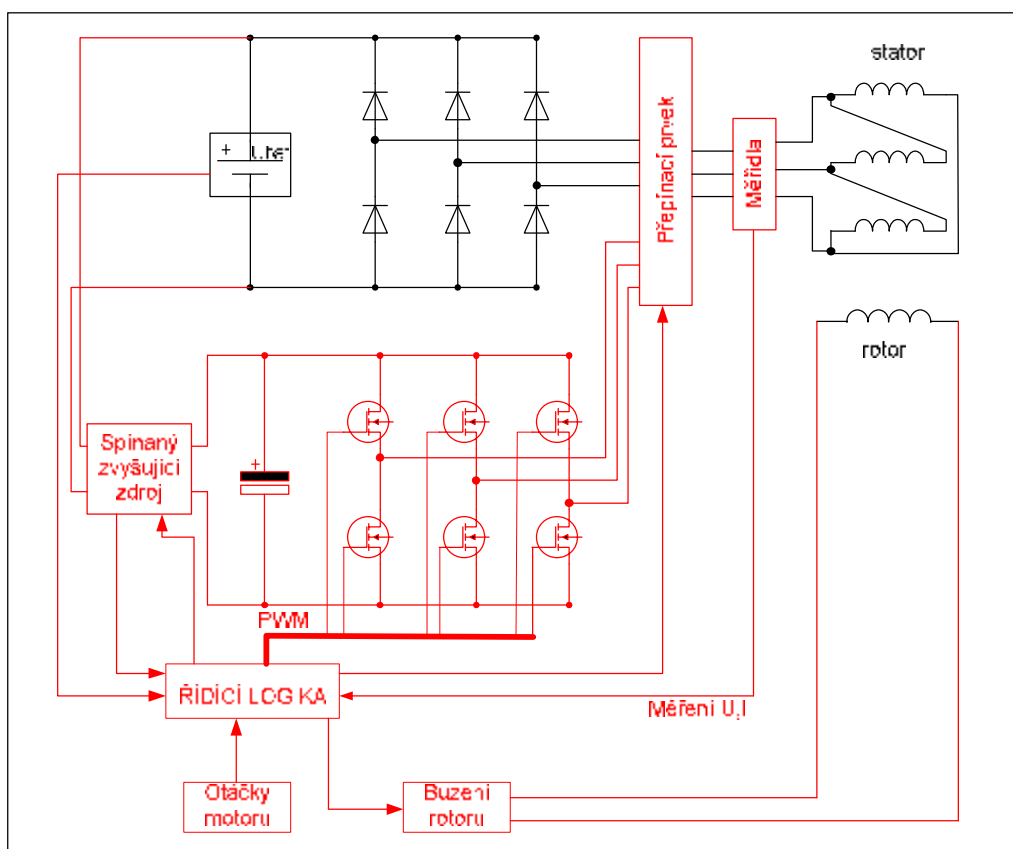
Jelikož je napětí akumulátoru ve vozidle dosti nízké přibližně $U_{\text{bat}} = 12\text{V}$, nelze zanedbat napěťové úbytky na jednotlivých tranzistorech. Tyto úbytky by snížily napětí na statoru a klesl by i moment motoru. Pro odstranění tohoto poklesu je použit

polovodičový spínaný zdroj, který dokáže zvýšit napětí v meziobvodu a následně eliminovat napěťové ztráty na tranzistorech.

Otáčky na alternátoru budou snímány řídicí logikou, která bude zároveň modulovat frekvenci úměrnou těmto otáčkám. Z důvodu převodu momentu mezi alternátorem a motorem pomocí klínového řemene, na kterém může docházet k prokluzu, není možné řídit napájecí frekvenci přímo dle otáček motoru. Snímač otáček motoru je připojen z důvodu aktivace resp. deaktivace napájení synchronního motoru. Výstup elektroniky bude připojen na řídicí elektrody jednotlivých tranzistorů.

Na obr. 2.4 je návrh elektrického zapojení alternátoru, který by mohl pracovat i jako motor. Schéma řeší silovou část. Regulační prvky jsou znázorněny pomocí bloků.

- Původní zapojení
- Návrh zapojení pro řízení synchronního stroje jako motoru



Obr. 2.4 Zapojení usměrňovače

3. VLASTNÍ MĚŘENÍ

3.1 Příprava měření

Nejprve bylo provedeno měření synchronního stroje v režimu alternátoru. Alternátor byl poháněn stejnosměrným strojem, na kterém bylo možné pomocí regulovatelného zdroje plynule měnit otáčky. Měření se uskutečnilo pro různé budící proudy I_b a pro tři režimy zatěžování (naprázdno, nakrátko a se zátěží 3krát 1.5Ω zapojenou do trojúhelníku). Toto měření ukázalo, co lze od alternátoru očekávat, hlavně z hlediska dodávaného proudu resp. výkonu. Z těchto hodnot je možné získat představu o maximálním mechanickém výkonu, který je schopen alternátor dodávat, když bude zapojen jako synchronní motor. Výsledky tohoto měření jsou v následující části.

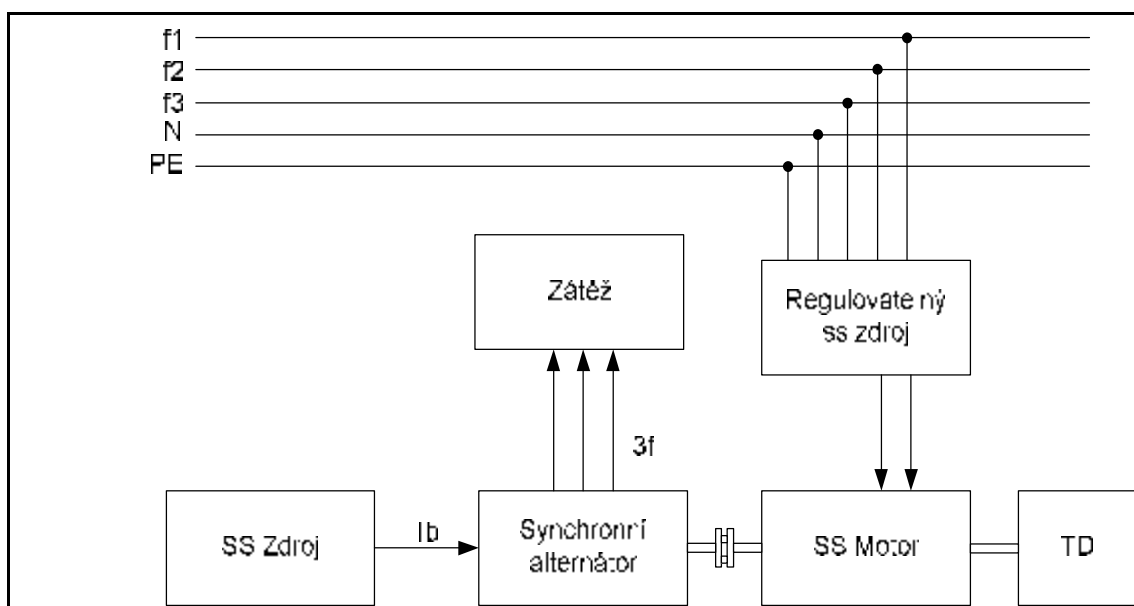
Pro měření alternátoru jako motoru bylo potřeba vyřešit několik zásadních věcí. Jednalo se hlavně o způsob napájení a řízení otáček motoru. První variantou bylo zakoupení frekvenčního měniče, který je schopen dodávat 3fázové napájení o amplitudě 12V, proud max. 50A a výstupní frekvenci v rozsahu 0 až 400 Hz, což je dáno maximálními požadovanými otáčkami a počtem pólových dvojic. Hodnota proudu byla určena podle štítkových údajů na alternátoru. Tato varianta byla ovšem zamítnuta po zjištění pořizovací ceny tohoto měniče. Druhou možností bylo použití standardního frekvenčního měniče, který splňoval požadované frekvenční podmínky. Pro dosažení požadovaných hodnot proudu a napětí byl použit 3fázový transformátor, který byl schopen tento výkon dodávat.

Po naměření potřebných charakteristik a průběhů byl alternátor rozebrán, bylo provedeno jeho změření a provedena expertíza pro jednotlivé části.

Všechny veličiny v následujících měřeních jsou uváděny v efektivních hodnotách a v případě napětí a proudu se vždy jedná o sdružené veličiny.

3.2 Měření synchronního stroje jako alternátoru

Alternátor vyrábí střídavý proud, který je usměrňován diodovým můstkem. Napětí alternátoru je regulováno proudem budícího vinutí. Pro zjištění skutečných parametrů alternátoru bylo potřeba provést jeho důkladná proměření při režimu naprázdno, nakrátko a s jmenovitou zátěží $1,5 \Omega$ zapojenou do trojúhelníka. Měření bylo provedeno v laboratoři B-EL2 na Technické univerzitě v Liberci. Pro roztáčení byl použit stejnosměrný motor napájený regulovatelným zdrojem. Pro upevnění alternátoru bylo potřeba nechat vyrobit držák, který by se mohl uchytit na měřicí stůl a který by umožnil pohyb ve všech třech osách stolu. Pro spojení hřídelí těchto dvou strojů byla vyrobena půlspojka tak, aby ji bylo možno propojit s již existující spojkou na stejnosměrném motoru.



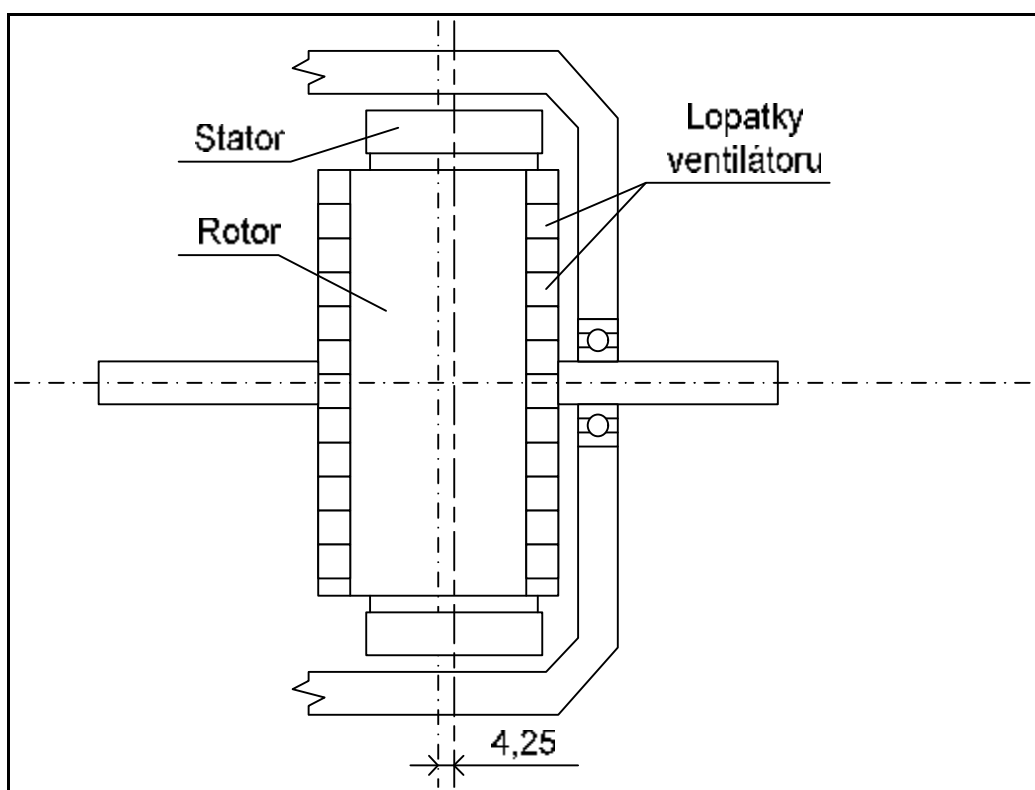
Obr. 3.1 Blokové schéma měření synchronního alternátoru

Z alternátoru bylo odstraněno plastové čelo a integrovaný řídicí obvod. Výstupní napětí a proudy byly odečítány přímo na koncích jednotlivých vinutí, proto musely být demontovány i usměrňovací diody.

Na buzení byl použit stabilizovaný zdroj s napětovým rozsahem 0V až 30V. Při napájení $U_b=12V$ dosahoval rotorový proud hodnoty $I_b=3,8A$.

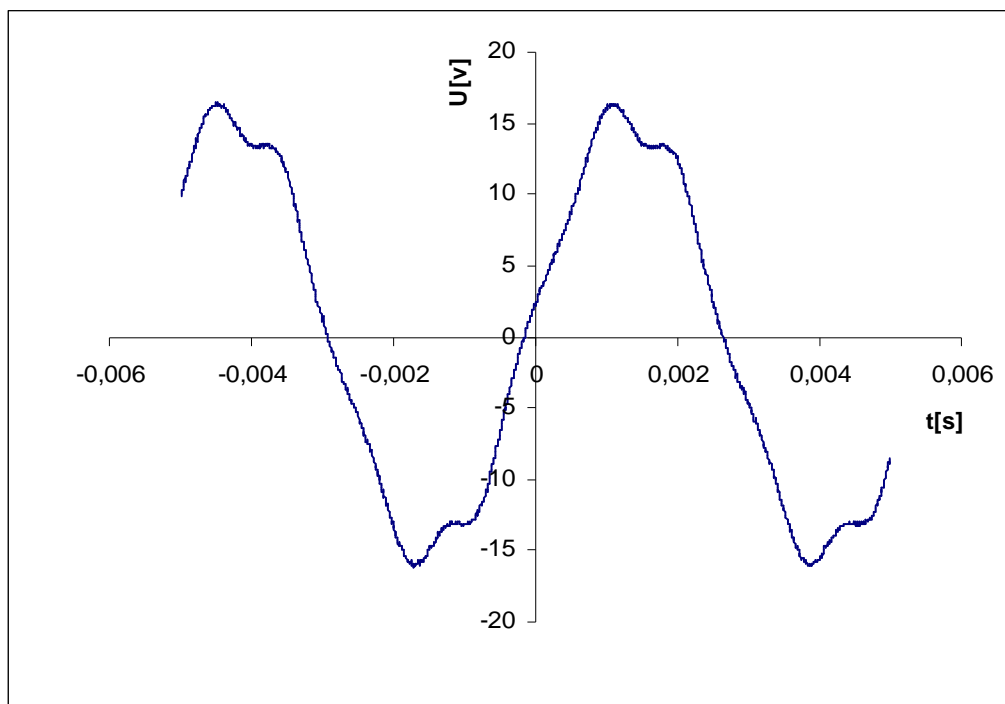
3.3 Průběh výstupního napětí

Průběh napětí vykazuje odchylku od sinusového průběhu a vrchol je značně deformován, jak je vidět na grafu 3.1. Přesné příčiny této deformace vrcholu napětí by vyžadovaly důkladnější proměření s rozpojením trojúhelníkového zapojení statorového vinutí. Na základě pozdějšího rozebrání stroje je možné usoudit, že deformace vrcholů je způsobena nesymetrickým uložením rotoru vůči statoru. Vertikální osa rotoru je posunuta o 4,25 mm oproti vertikální ose statoru, toto posunutí je znázorněno na následujícím obrázku 3.2.



Obr. 3.2 Nesymetrie uložení rotoru

Vezmeme-li v úvahu, že alternátor dobíjí akumulátor a má zúžený průběh napětí (tzn. napětí obsahuje vyšší harmonický), proud dodávaný do akumulátoru má pulzní charakter a tím se zvyšují ztráty v alternátoru, které se projevují ve formě stoupající teploty statorového vinutí.



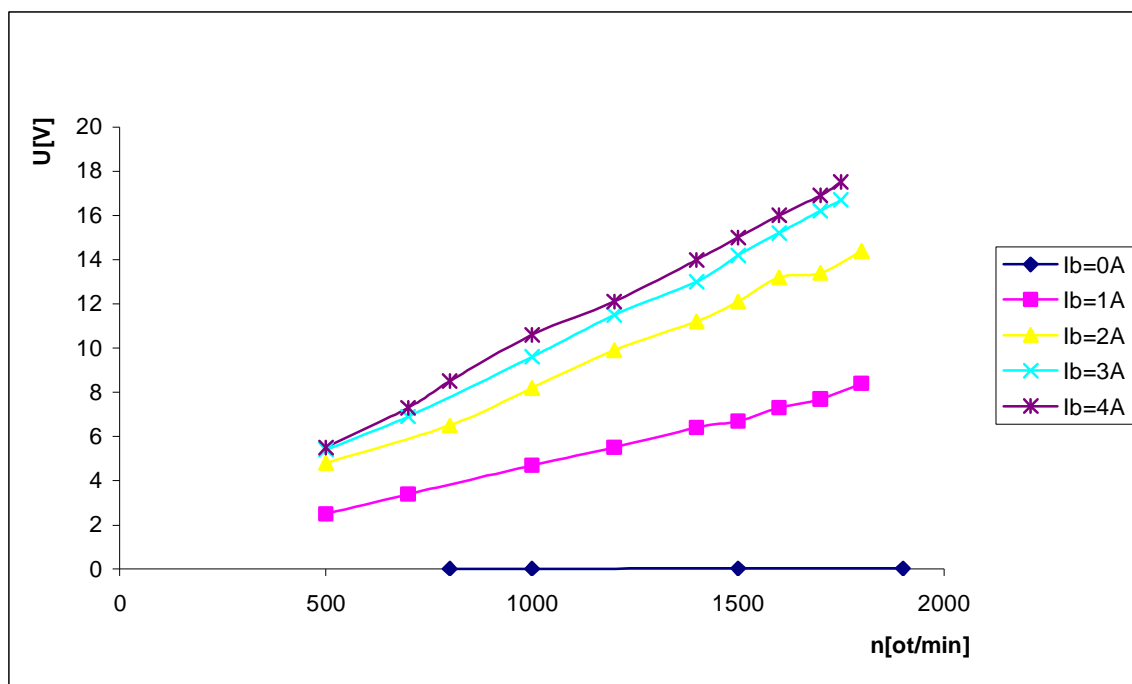
Graf 3.1 Výstupní napětí alternátoru

3.4 Průběh výstupního napětí nezatíženého stroje

Napětí alternátoru bylo měřeno při různém budícím proudu I_B (viz. tab.3.4.1). Z grafu 3.2 je zřejmé, že napětí v proměřovaných otáčkách lineárně stoupá v závislosti na budícím proudu.

Tab. 3.4.1 Hodnoty pro napětí naprázdno

$I_b=0A$									
$n[ot/min]$	800	1000	1500	1900					
$U_{out}[V]$	0,014	0,017	0,026	0,032					
$I_b=1A$									
$n[ot/min]$	500	700	1000	1200	1400	1500	1600	1700	1800
$U_{out}[V]$	2,5	3,4	4,7	5,5	6,4	6,7	7,3	7,7	8,4
$I_b=2A$									
$n[ot/min]$	500	800	1000	1200	1400	1500	1600	1700	1800
$U_{out}[V]$	4,8	6,5	8,2	9,9	11,2	12,1	13,2	13,4	14,4
$I_b=3A$									
$n[ot/min]$	500	700	1000	1200	1400	1500	1600	1700	1750
$U_{out}[V]$	5,4	6,9	9,6	11,5	13	14,2	15,2	16,2	16,7
$I_b=4A$									
$n[ot/min]$	500	700	800	1000	1200	1400	1500	1600	1700
$U_{out}[V]$	5,5	7,3	8,5	10,6	12,1	14	15	16	16,9



Graf 3.2 Průběh napětí naprázdno

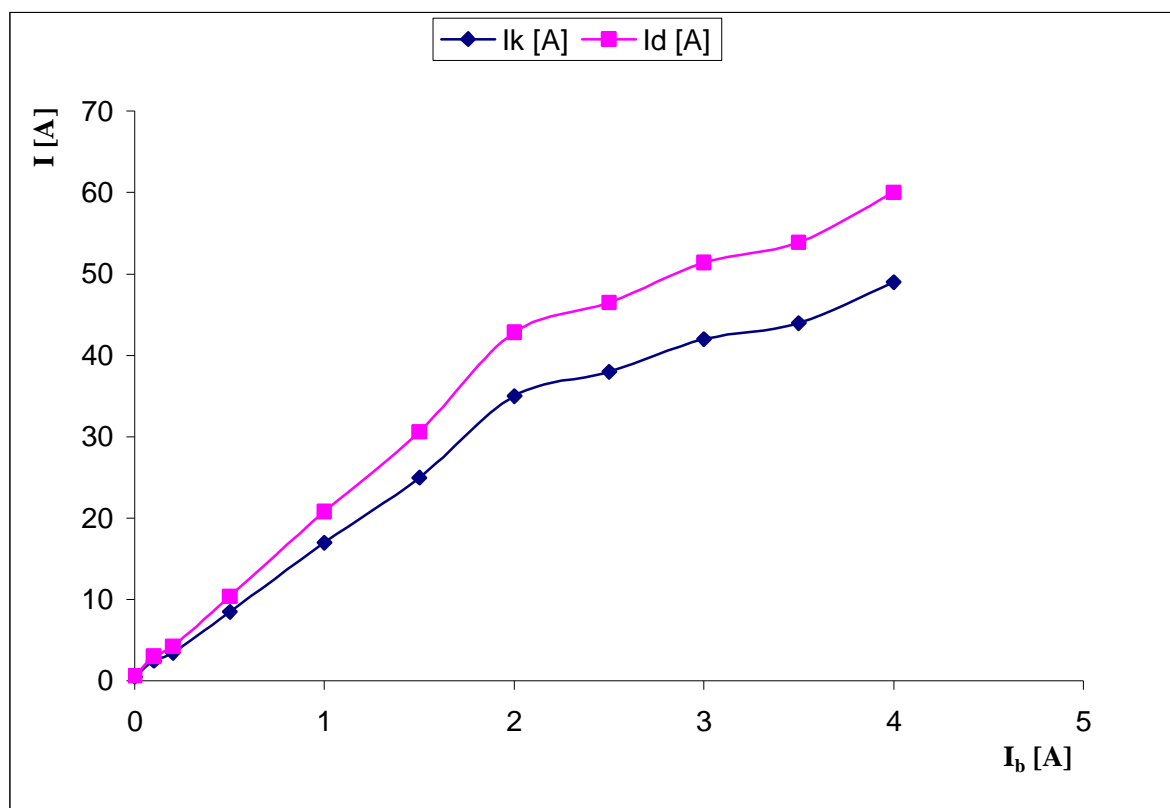
Na grafu 3.2 je vidět, že napětí v měřeném rozsahu stoupá lineárně. Směrnice a posunutí přímky jsou závislé na budícím proudu. Alternátor dodává baterii energii pouze tehdy, když je jeho napětí vyšší než napětí baterie (tj. 12V). Na grafu 3.2 je vidět, že tato hodnota je dosažena při 1200 ot.min^{-1} . Musí se však odečíst úbytek napětí na usměrňovacích diodách (cca. 1,4V). Aby byl alternátor schopen dobít baterii jsou tedy potřeba otáčky alespoň 1400 min^{-1} při budícím proudu 4A. Otáčky motoru jsou v porovnání s otáčkami alternátoru poloviční, což je dáno převodovým poměrem. Proto při volnoběžných otáčkách motoru, které jsou 850 ot.min^{-1} , již dochází k dobíjení baterie.

3.5 Průběh proudu při zkratu

Měření nakrátko bylo provedeno při konstantních otáčkách, nezávisle proměnnou hodnotou byl budící proud, viz tab. 3.5.1. Cílem bylo zjistit velikost maximálního proudu, který je schopen alternátor dodat při těchto otáčkách a následně dopočítat proudové zatížení drátů vinutí. Toto zatížení je dosti vysoké a je již spočítáno v kapitole 2.2.

Tab. 3.5.1 Hodnoty zkratového proudu

n=2000 ot/min											
I_b [A]	0	0,1	0,2	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
I_k [A]	0,5	2,5	3,5	8,5	17	25	35	38	42	44	49
I_d [A]	0,6	3,1	4,3	10,4	20,8	30,6	42,8	46,5	51,4	53,9	60,0



Graf 3.4 Průběh proudu nakrátko

Jak je vidět z grafu 3.4, maximální efektivní hodnota naměřeného proudu je 49 A při 2000 ot min^{-1} . Tento proud byl na výstupu jedné fáze statorového vinutí, což odpovídá proudu 60 A na výstupu usměrňovacích diod, které však byly při měření odpojeny.

Měření při vyšších otáčkách nebylo z technických důvodů v laboratoři možné.

3.6 Měření na zátěži

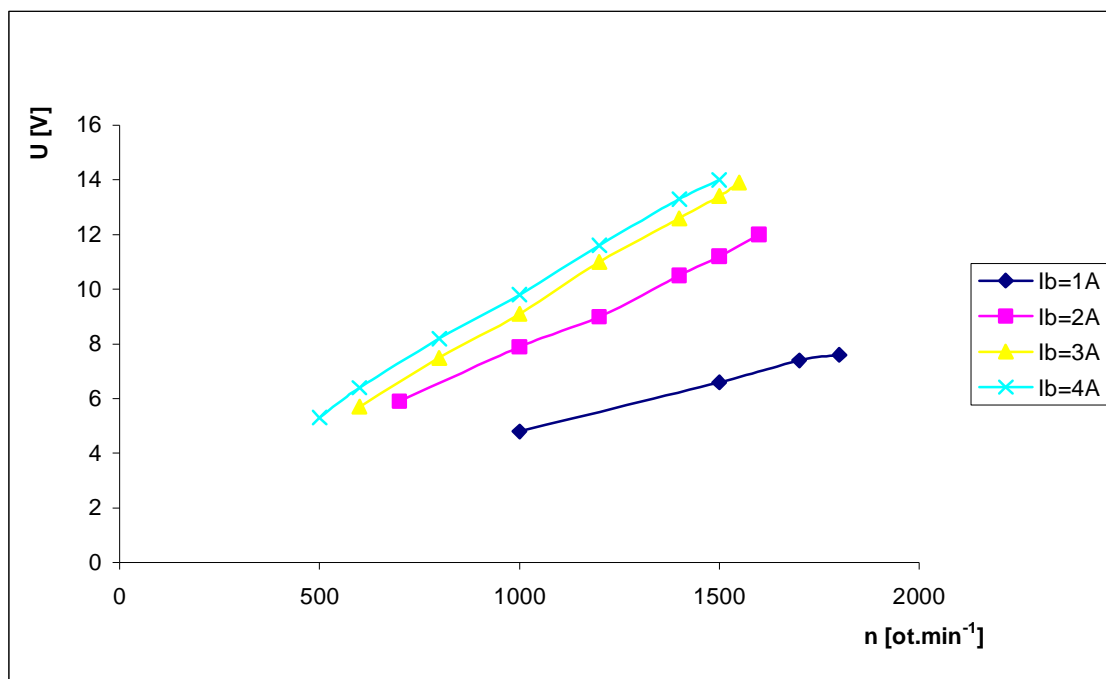
Pro následující měření bylo dosti obtížné realizovat třífázovou odporovou zátěž, která by snesla dodávaný výkon. Nakonec byly zvoleny tři výkonové odpory o velikosti $1,5\ \Omega$, zapojené do trojúhelníka, které výkon krátkodobě snesly. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 3.6.1.

Tab. 3.6.1 Hodnoty získané při měření na odporové zátěži

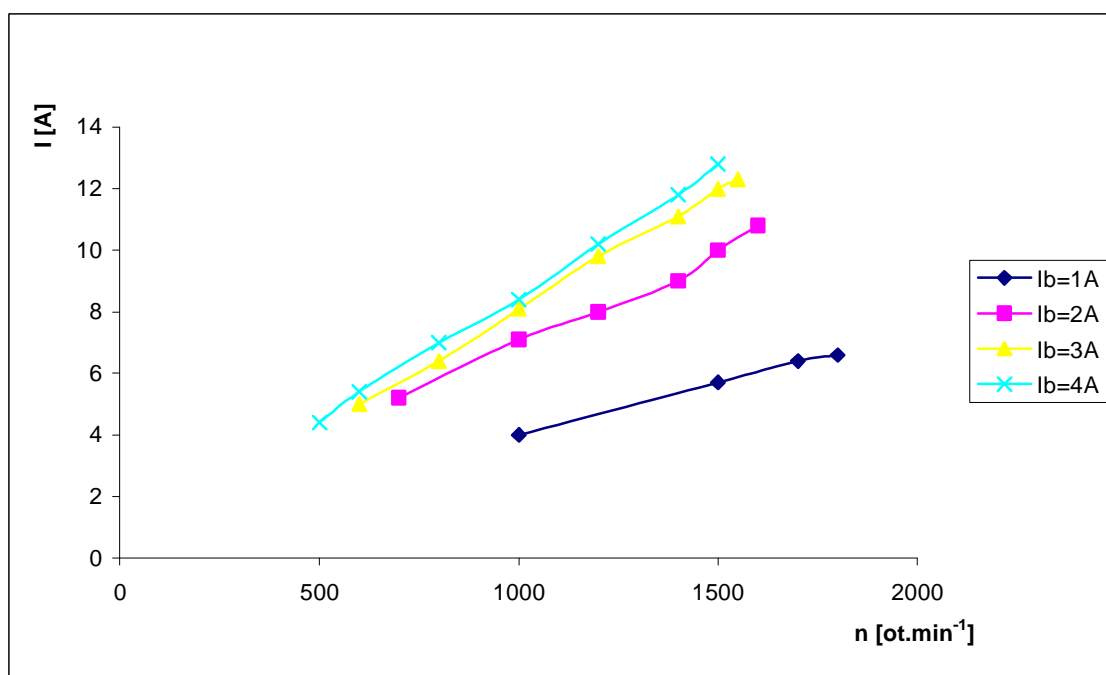
$I_b = 1\text{ A}$							
$n[\text{ot/min}]$	1000	1500	1700	1800			
$I_{\text{out}}[\text{A}]$	4	5,7	6,4	6,6			
$U_{\text{out}}[\text{V}]$	4,8	6,6	7,4	7,6			
$P[\text{W}]$	33,26	65,16	82,03	86,88			
$I_b = 2\text{ A}$							
$n[\text{ot/min}]$	700	1000	1200	1400	1500	1600	
$I_{\text{out}}[\text{A}]$	5,2	7,1	8	9	10	10,8	
$U_{\text{out}}[\text{V}]$	5,9	7,9	9	10,5	11,2	12	
$P[\text{W}]$	53,14	97,15	124,71	163,68	193,99	224,47	
$I_b = 3\text{ A}$							
$n[\text{ot/min}]$	600	800	1000	1200	1400	1500	1550
$I_{\text{out}}[\text{A}]$	5	6,4	8,1	9,8	11,1	12	12,3
$U_{\text{out}}[\text{V}]$	5,7	7,5	9,1	11	12,6	13,4	13,9
$P[\text{W}]$	49,36	83,14	127,67	186,72	242,24	278,51	296,13
$I_b = 4\text{ A}$							
$n[\text{ot/min}]$	500	600	800	1000	1200	1400	1500
$I_{\text{out}}[\text{A}]$	4,4	5,4	7	8,4	10,2	11,8	12,8
$U_{\text{out}}[\text{V}]$	5,3	6,4	8,2	9,8	11,6	13,3	14
$P[\text{W}]$	40,39	59,86	99,42	142,58	204,94	271,83	310,38

Na grafu 3.4 je vidět, že při zatížení alternátoru dochází k poklesu výstupního napětí oproti napětí naprázdno. Regulace výstupního napětí se provádí pomocí budícího proudu I_b . Při extrémním zatížení, kdy již nelze regulovat pomocí I_b , musí dojít ke zvýšení otáček motoru.

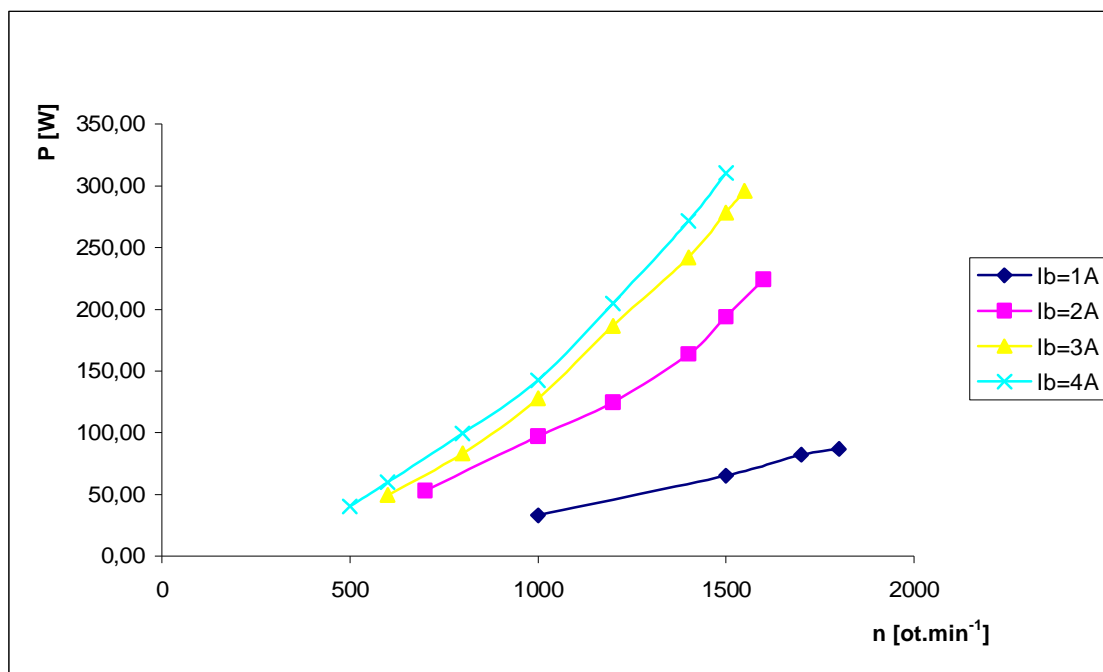
Prou i výkon jsou závislé na zvyšujícím se napětí, protože zátěž je stále stejná. Musí tedy platit ohmův zákon. V grafu 3.5 je uveden průběh proudu na otáčkách motoru. V grafu 3.6 je průběh dodávaného výkonu v závislosti na otáčkách.



Graf 3.4 Závislost výstupního napětí na otáčkách



Graf 3.5 Závislost výstupního proudu na otáčkách



Graf 3.6 Závislost výkonu na otáčkách

3.7 Měření na vozidle Octavia

Na základě realizovaných měření bylo provedeno měření alternátoru na osobním vozidle Octavia platforma A5, 103 kW TDI v Technickém vývoji Škoda Auto a.s.. Ve vozidle však nebyl alternátor Valeo, ale alternátor od firmy Bosch. Statorové vinutí je tvořené dvěma Cu vodiči o průměru 1,6 mm. Jako zátěž alternátoru byly použity všechny dostupné spotřebiče ve vozidle (plné osvětlení vozu, topení, vyhřívání zrcátek, zadního skla, obou předních sedadel a dorazy čtyř motorků oken ve dveřích).

Konstantně bylo odebíráno 95A, při zatížení dorazy motorků krátkodobě 120A. Motor byl ve volnoběžných otáčkách 850 min^{-1} , ale občas si je musel z důvodu zátěže zvednout na 1050 min^{-1} . Pomocí nalepovacích štítků na měření teploty byla měřena teplota na povrchu vinutí. Teplota vinutí vystoupala až na 110° a to po 60 s od startu motoru.

Z průměru vodiče ve statorovém vinutí lze spočítat obsah $S = 4 \text{ mm}^2$. Při daném zatížení $I_d = 95 \text{ A}$ je efektivní hodnota proudu před usměrňovačem $77,5 \text{ A}$ a jelikož je stator zapojen do trojúhelníka lze dle vztahu 2.2.1 určit proud v jedné fázi $I_v = 44,8 \text{ A}$, což odpovídá proudové hustotě $\sigma = 11,19 \text{ A.mm}^{-2}$.

Pokud by byl použit alternátor Valeo 120A, který má statorové vinutí $2 \times 1 \text{ mm}$, byla by proudová hustota $\sigma = 28,5 \text{ A.mm}^{-2}$.

Toto měření bylo provedeno hlavně proto, aby bylo zjištěno jak se alternátor chová ve vozidle. Měření bohužel nebylo provedeno na alternátoru Valeo, ve kterém mají statorové vodiče menší průměr a tudíž by docházelo k většímu proudovému namáhání.

4. MATEMATICKÝ POPIS SYNCHRONNÍHO STROJE JAKO MOTORU

4.1 Měření odporu

Pro měření indukčnosti a činného odporu bylo potřeba stroj demontovat a rozpojit cívky na statoru. Činný odpor byl změřen dvěma způsoby. Nejprve čtyřvodičovou metodou pro malé odpory pomocí stejnosměrného zdroje, voltmetru a ampérmetru. Podruhé byl změřen také čtyřvodičovou metodou na multimetru Agilent 34401A. Výsledky měření činného odporu jsou v tabulce 4.1.1, v posledním sloupci tabulky jsou hodnoty z multimetru Agilent. Měření bylo opakováno pro každou fázi zvlášť a do náhradního schématu je použit aritmetický průměr těchto hodnot.

Tab. 4.1.1 Měření odporu

	U [V]	I [A]	R [Ω]	Agilent R [Ω]
rotor	3,15	1	$R_b=3,15 \Omega$	3,211
1. fáze	0,09	1,5	0,06	0,055
2. fáze	0,08	1,5	0,05	0,059
3. fáze	0,09	1,5	0,06	0,057
			$R_s=0,06 \Omega$	0,057

4.2 Měření indukčnosti

Nyní je možné určit indukčnost. K zjištění indukčnosti byl použit autotransformátor, který sloužil jako zdroj harmonického napětí o síťové frekvenci 50 Hz. Po připojení vinutí na zdroj napětí začne procházet proud, z čehož je dopočítána impedance dle vztahu $Z=U/I$. Z impedance byla dopočítána reaktance a z té dále indukčnost vinutí.

První měření bylo provedeno bez rotoru, tedy pouze na statoru. Jednotlivé cívky byly rozpojeny, aby nedocházelo k vzájemné indukčnosti dvou vinutí. Měření se opakovalo dvakrát pro rozdílné proudy. Výsledná vlastní indukčnost je průměr těchto hodnot. Jak je vidět z následující tabulky, pro obě měření vyšly indukčnosti stejné.

Tab. 4.2.1 Parametry statorového vinutí

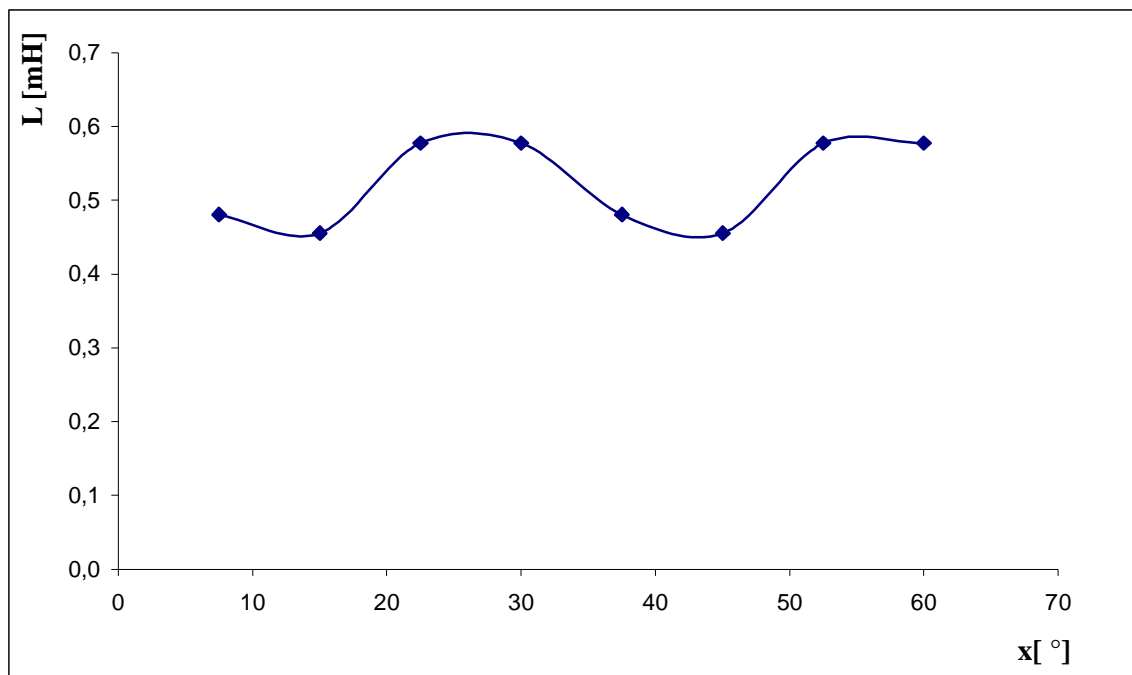
I [A]	U [V]	Z [Ω]	X _L [Ω]	L [mH]
4,3	0,45	0,10	0,09	0,27
8	0,85	0,10	0,09	0,27

Indukčnost vinutí v motoru však není konstantní, a jak již bylo řečeno v kapitole 1.3, je její sinusový průběh závislý na otáčejícím se rotoru. K zjištění skutečné závislosti indukčnosti na poloze rotoru bylo přizpůsobeno další měření. Do statorového vinutí byl vložen rotor, který byl postupně natáčen tak, aby se indukčnost měnila od maxima k minimu. Indukčnost se periodicky opakuje a jedna perioda probíhá při natáčení rotoru od 0° do 60°, toto natočení je v tabulce značeno písmenem x. Po zprůměrování hodnot indukčnosti byla určena střední hodnota indukčnosti $L = 0,52$ mH. Velikost indukčnosti je dosti malá a proto se dá soudit, že stroj je konstruován na vyšší jmenovité otáčky než otáčky odpovídající frekvenci 50 Hz.

Tab. 4.2.2 Závislost indukčnosti vinutí jedné fáze na pootočení rotoru

x [°]	I [A]	U [V]	Z [Ω]	X _L [Ω]	L [mH]
7,5	7,8	1,08	0,14	0,15	0,48
15	7,7	1,00	0,13	0,14	0,46
22,5	7,6	1,30	0,17	0,18	0,58
30	7,6	1,30	0,17	0,18	0,58
37,5	7,8	1,08	0,14	0,15	0,48
45	7,7	1,00	0,13	0,14	0,46
52,5	7,6	1,30	0,17	0,18	0,58
60	7,6	1,30	0,17	0,18	0,58

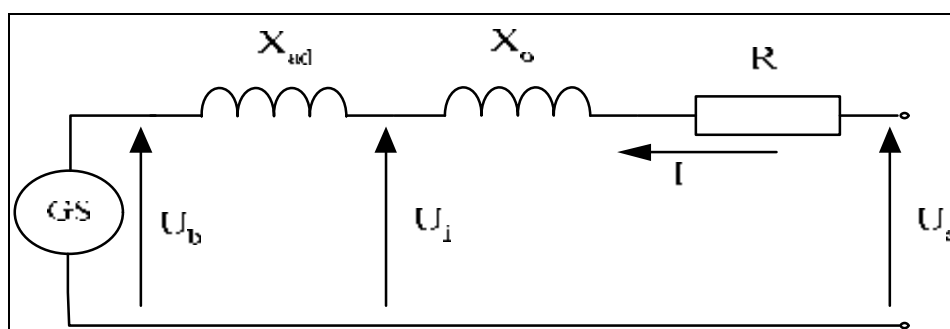
Hodnoty z tabulky 4.2.2 byly vyneseny do grafu 4.1. Je vidět, že změna indukčnosti vinutí se opravdu blíží sinusovému průběhu.



Graf 4.1 Závislost indukčnosti vinutí jedné fáze na natočení rotoru

4.3 Náhradní schéma jedné fáze

Náhradní schéma jedné fáze synchronního stroje je popsáno v kapitole 1.3.2. Jednotlivé odpory v obvodu byly určeny z měření činného odporu a reaktance cívky (kap.4.1, resp. 4.2).



Obr. 5.1 Náhradní schéma synchronního motoru

Velikosti součástek a veličin jsou :

$U_s = 9,2V$	napájecí napětí na statorových svorkách
$I = 2,3A$	proud při frekvenci 50 Hz (viz. kap.5.2)
$R = 0,06 \Omega$	činný odpor statorového vinutí
$X_{ad} = XL = 0,16 \Omega$	reaktance cívky s indukčností 0,52 mH při frekvenci 50 Hz
X_σ	bylo zanedbáno s předpokladem, že je řadově nižší než X_{ad}

Pro výpočet napětí indukovaného statorem byla použita rovnice 1.3.7, ze které bylo vyjádřeno napětí U_b .

$$U_b = U_s - I(R + X_L)$$

$$U_b = (9,2 - 2,3(0,06 + 0,16))V$$

$$\underline{\underline{U_b = 8,7V}}$$

Jak je vidět, po připojení napětí 9,2V na statorové vinutí se na něm bude indukovat napětí pouze 8,7V. Rozdíl těchto dvou napětí jsou ztráty na vinutí. Je zřejmé, že se budou ztráty zvyšovat úměrně s frekvencí, protože dle vztahu $X_L = j\omega L$ poroste reaktance cívky. U tohoto stroje však byly problémy se zahříváním vinutí, což mělo za následek růst činného odporu (resp. zvýšení ztrát). Točivý moment motoru je úměrný druhé mocnině napětí, proto při poklesu napětí bude klesat i moment s druhou mocninou. K tomu, aby k poklesu nedocházelo, je potřeba zvyšovat na vstupu napětí tak, aby byl poměr U/f konstantní.

5. MĚŘENÍ SYNCHRONNÍHO STROJE JAKO MOTORU

Synchronní motor by měl spalovacímu motoru vypomáhat v otáčkách 800 – 2000 min⁻¹. Alternátor se však ve vozidle otáčí dvojnásobnou rychlostí, což je dáno převodovým poměrem řemenic na motoru a na alternátoru. Proto bylo potřeba synchronní motor proměřit v otáčkách 1600 min⁻¹ až 4000 min⁻¹.

5.1 Příprava měření

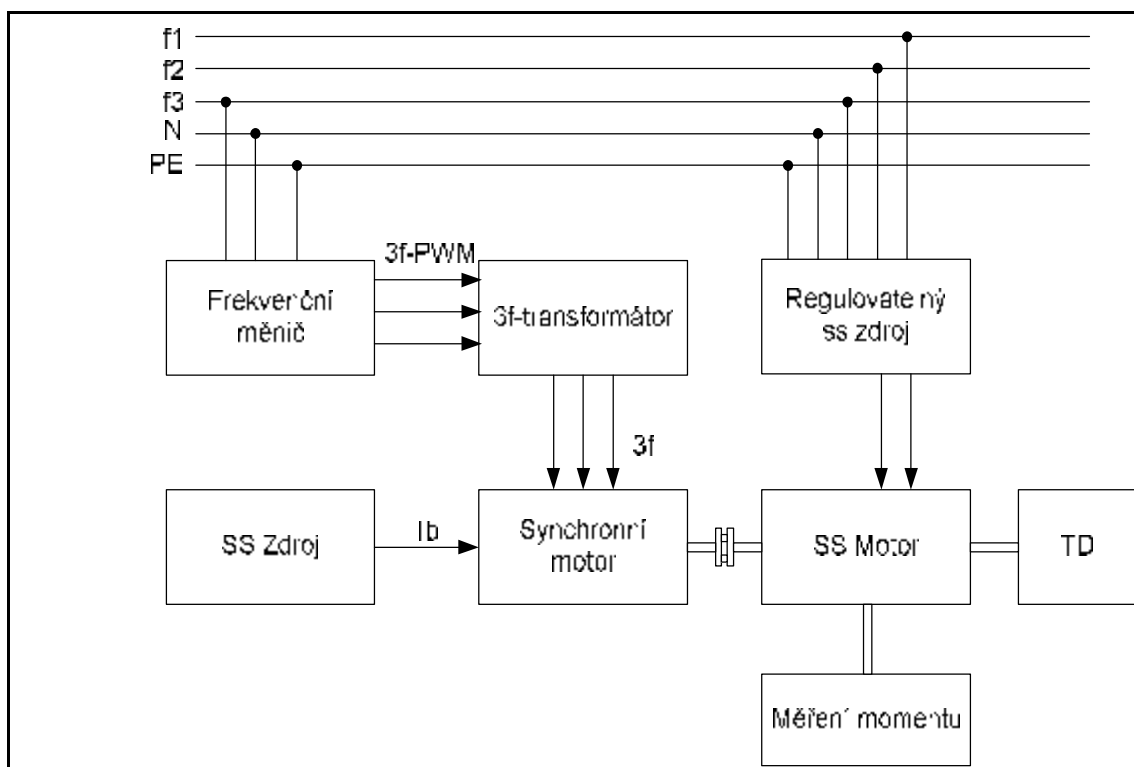
Měření stroje ve funkci synchronního motoru bylo provedeno na stejném zařízení jako měření stroje v generátorickém režimu. Jelikož se jednalo o synchronní motor, byl potřeba vyřešit způsob rozběhu. Jako první možnost byla uvažována varianta s rozběhovým motorem. Pro toto řešení bylo použito stejnosměrného motoru, se kterým byl již alternátor propojen, stejně jako v předchozím měření. Pomocí rozběhového motoru, napájeného regulovatelným zdrojem stejnosměrného napětí, byl synchronní stroj roztočen na požadované otáčky. Po dosažení těchto otáček byl spuštěn polovodičový frekvenční měnič, na kterém byla nastavena frekvence odpovídající požadovaným otáčkám. U této metody ale nastávaly problémy se synchronizací měniče a skutečných otáček motoru. Proto byla zvolena metoda rozběhu pomocí frekvenčního měniče. Na měniči byla nastavena frekvence blízká nule, při které motor vklouzl do synchronních otáček odpovídajících této frekvenci. Postupným zvyšováním této frekvence byl motor roztočen na požadované otáčky.

Je zřejmé, že pro oba způsoby rozběhu i řízení otáček bylo potřeba pořídit frekvenční měnič splňující tyto podmínky:

- Ø Výstupní napětí 12V
- Ø Výstupní proud cca 50A – vychází z hodnoty zjištěné při měření alternátoru nakrátko.
- Ø Výstupní frekvence 0 – 400 Hz – vychází z počtu pólových dvojic, kterých je 6 a z maximálních požadovaných otáček 4000 min⁻¹.

Polovodičový měnič splňující tyto podmínky je velice drahý, proto byl použit standardní měnič Dinverter 2B. Tento měnič se však používá pro standardní pohony 3×400V a jeho výstupní proud je 7A. Na základě těchto údajů byla výstupní energie přetransformována na požadované hodnoty napětí a proudu. Byl použit 3-fázový transformátor BTV 1,6 1600 VA. Po připojení frekvenčního měniče na transformátor,

byla efektivní hodnota napětí na sekundárním vinutí 9,2V což odpovídá špičkové hodnotě 13V.



Obr. 5.2 Blokové schéma měření synchronního motoru

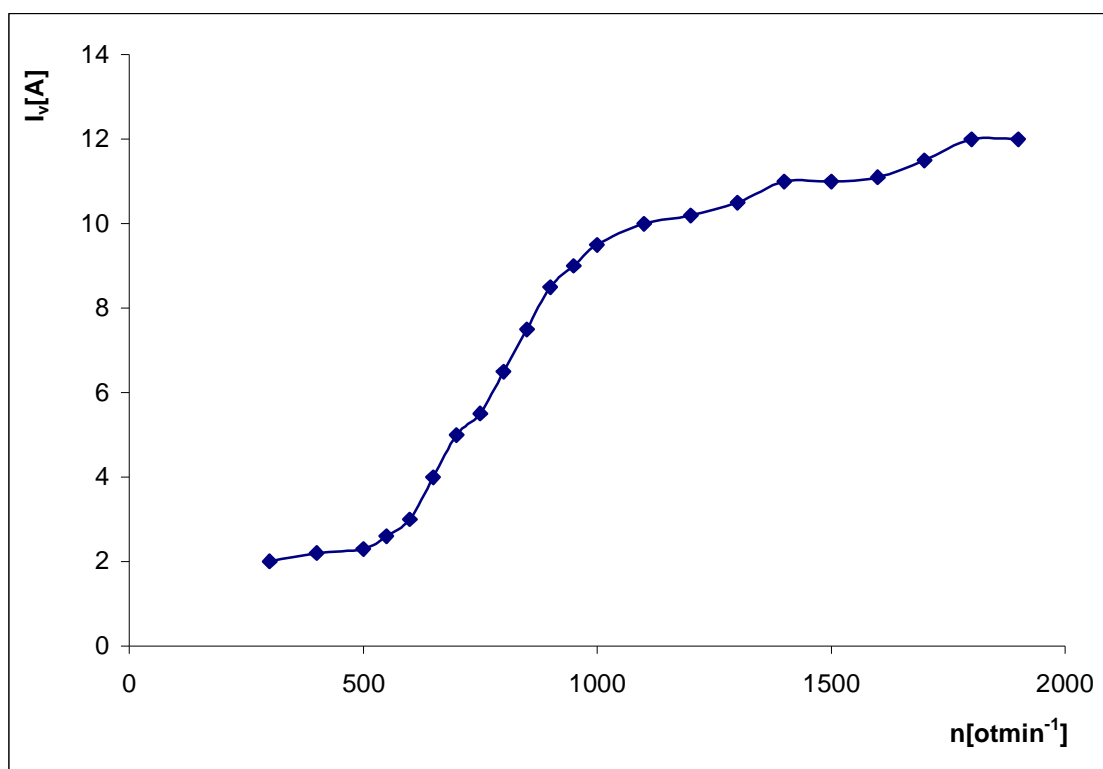
5.2 Měření napájecího proudu při chodu naprázdno

Při tomto měření překonával synchronní motor pouze pasivní odpory a to svůj a stejnosměrného motoru, na kterém se měřily otáčky. Budící proud rotorem byl nastaven na konstantní hodnotu $I_b = 2,1\text{A}$. Motor byl proměřen v rozsahu 0 až 1900 ot.min^{-1} (viz. tab. 5.2.1). Při této hodnotě docházelo k vypadnutí ze synchronizace. Je velice pravděpodobné, že k tomuto výpadku došlo kvůli zvyšujícím se pasivním odporům na synchronním i stejnosměrném motoru. Při otáčkách 1900 min^{-1} nastala rovnováha maximálního točivého momentu a momentu pasivních odporů. V důsledku špatného chlazení a vysokého proudu statorovým vinutím docházelo k jeho značnému zahřátí a zvýšil se úbytek napětí na tomto vinutí. Nedostatečné chlazení bylo zapříčiněno již zmíněným posunutím rotoru vůči statoru ve vertikálním směru (viz. obr. 3.2), kdy jsou rotorové lopatky chlazení z jedné strany překryty statorovým vinutím. Je jasné, že toto chlazení není dimenzováno na motorický chod v takto nízkých otáčkách. Dále se začalo

ukazovat, že značným problémem stroje, který byl navržen jako alternátor, jsou jeho trojúhelníkové póly.

Tab. 5.2.1 Odběr proudu při chodu naprázdno

n [otmin ⁻¹]	300	400	500	550	600	650	700	750	800	850	900
I [A]	2,0	2,2	2,3	2,6	3,0	4,0	5,0	5,5	6,5	7,5	8,5
n [otmin ⁻¹]	950	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
I [A]	9,0	9,5	10,0	10,2	10,5	11,0	11,0	11,1	11,5	12	12



Graf 5.1 Odběr proudu při chodu naprázdno

5.3 Měření točivého momentu

Točivý moment dodávaný tímto synchronním strojem je hlavní ukazatel použitelnosti v motorickém režimu. Pro měření bylo použito stejné zapojení jako při měření nezatíženého motoru. Motor byl postupně roztočen na požadované otáčky a následně bylo na rotor připojeno maximální budící napětí 12 V. Rotorem procházel maximální budící proud 3,8 A. K brzdění a měření momentu byl použit stejnosměrný motor. Stator motoru je konstruován tak, že při mechanickém zatížení rotoru dojde

k pootočení a přes připevňené rameno o délce 486,55 mm k přenosu síly, která je úměrná momentu. Síla byla měřena pomocí standardní váhy (viz obr.5.3).

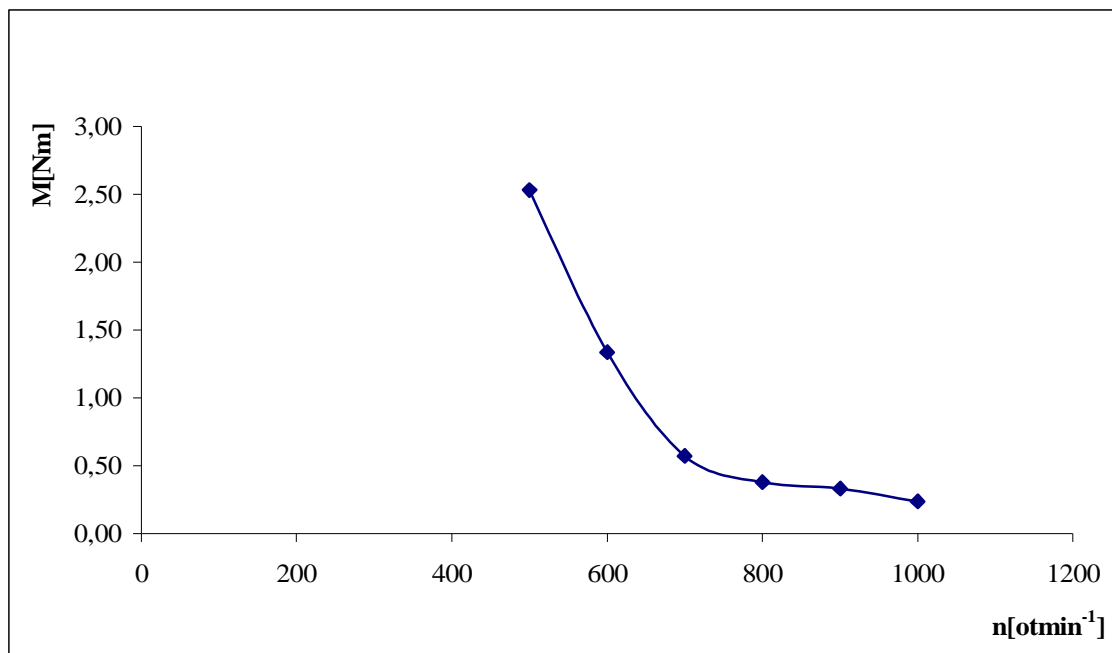


Obr. 5.3 Soustava pro měření momentu

Při dosažení požadovaných otáček synchronního stroje se na stejnosměrný motor připojilo napětí, které vyvolalo točivý moment působící proti momentu synchronního motoru. Tento moment byl měřen pomocí ramena a váhy. Maximální moment byl vyvinut těsně před výpadkem ze synchronizace.

Tab. 5.3.1 Měření točivého momentu

n [ot min ⁻¹]	500	600	700	800	900	1000
F [N]	5,2	2,7	1,2	0,8	0,7	0,5
M [Nm]	2,5	1,3	0,6	0,4	0,3	0,2



Graf 5.2 Závislost momentu na otáčkách

Jak je na grafu 5.2 vidět, maximální točivý moment byl naměřen při frekvenci 50Hz a poté již rychle klesal. Z důvodu nedostačujícího vlastního chlazení motoru docházelo k jeho častému přehřívání, při kterém nebyl motor schopen překonat ani pasivní odpory měřicí soustavy. Při otáčkách vyšších než 1000 otmin^{-1} byl moment na naší měřicí soustavě již neměřitelný.

6. POSOUZENÍ EFEKTIVITY V DANÉM ROZSAHU OTÁČEK

V předchozím měření momentu je patrné, že točivý moment při požadovaných otáčkách 1600 min^{-1} až 4000 min^{-1} nebylo možno změřit. Při otáčkách do 1900 min^{-1} dokázal moment překonávat pasivní odpory měřicí soustavy, ale již při minimálním zatížení došlo k výpadku ze synchronního chodu. Vyšších otáček nebylo možno dosáhnout, protože motor vypadával ze synchronního chodu bez vnějšího zásahu. Z tohoto důvodu lze učinit závěr, že efektivita použití stroje v požadovaných otáčkách je nulová. V další části této kapitoly bude zdůvodněno proč tomu tak je.

Hlavní problém je v konstrukci stroje, který je navržen pro funkci alternátoru. Pro bližší seznámení byl stroj rozebrán (obr. 6.1) a jeho jednotlivé části byly prozkoumány.



Obr. 6.1 Demontovaný synchronní stroj

Hlavním problémem jsou trojúhelníkové vyniklé póly na rotoru. Póly se postupně směrem od kořene zužují, což znamená, že plocha pólu se zmenšuje a přenáší nižší moment než kdyby byly obdélníkové.

Ze znalosti pólové rozteče lze určit, že na jeden pól a fázi připadá pouze jedna drážka. To znamená, že nad pólem se vždy fáze opakuje pouze jednou, zatímco u většiny synchronních strojů se fáze opakuje 1,5krát.

V neposlední řadě se jedná o vlastní chlazení, které je zajištěno pomocí lopatek na rotoru. Lopatky ochlazují pouze okraje vinutí a navíc, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3, jsou vertikální osy statoru a rotoru posunuty, proto jsou lopatky z jedné strany vystrčeny mimo vinutí víc než by měly být. Naopak z druhé strany jsou schované pod vinutím. Je však zřejmé, že i kdyby osy posunuty nebyly, chlazení by stejně nevyhovovalo a muselo by být zavedeno chlazení externí.

ZÁVĚR

Pro zjištění vhodnosti použití synchronního stroje bylo rozhodnuto na základě dvou různých měření a na pozdější demontáži stroje. Při měření stroje jako generátoru byly zjištěny dva základní poznatky. Na štítku výrobce udává, že alternátorem dodávaný proud může být až 120A. Měření však ukázala, že tato hodnota není dosažitelná v otáčkách do 2000 min^{-1} , kde jsme naměřili maximální zkratový proud v jedné fázi $I_k=49\text{A}$, což po přepočtu odpovídá proudu $I_d=60\text{A}$ za usměrňovacími diodami. Z toho lze soudit, že pracovní frekvence, při které dává stroj maximální výkon, bude vyšší než 200 Hz. Toto se potvrdilo při měření maximálního proudu přímo na vozidle, zde byl alternátor zatížen a proud chvilkově vzrostl až na 120A, ale toto zatížení nelze udržovat dlouhodoběji, protože již po 60 sekundách byla teplota na povrchu vinutí 110°C . Druhým poznatkem je značně zkreslené výstupní napětí, jehož průběh zdaleka není sinusový, ale spíše se blíží k průběhu trojúhelníkovému, který má zdeformované špičky. Po demontáži stroje bylo zjištěno, že vertikální osa rotoru a statoru jsou oproti sobě o 4,25 mm posunuty, což by mohlo mít za následek zmíněnou deformaci špiček výstupního napětí. Lze se domnívat, že kdybychom chtěli dosáhnout maximálního momentu při používání stroje jako motoru, bylo by potřeba namodulovat stejně zkreslený průběh napětí a tím stroj napájet. To by však bylo dosti obtížné. Při našem měření byl použit klasický měnič frekvence. Největší problémy během měření byly s rostoucí teplotou stroje, která při delším běhu vedla k vypadnutí motoru ze synchronizace. Maximální točivý moment, který byl změřen při frekvenci 50 Hz, byl 2,53 Nm, poté již klesal. Při frekvenci vyšší než 100Hz již nebylo možno moment změřit, protože motor vypadával ze synchronizace. Moment dodávaný synchronním motorem je tak malý, že se nevyplatí uvažovat o využití tohoto stroje jako pohonu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Bašta J., Teorie elektrických strojů, ČSAV Praha (1957)
- [2] Fetter F., Přehled silnoprůdové elektrotechniky, SNTL Praha (1957)
- [3] Heřmanský J. a kol., Příručka silnoprůdové elektrotechniky, SNTL Praha (1984)
- [4] Konečná E. a kol., Vybrané statě z elektrotechniky, skriptum TUL (2005)
- [5] Mayer D., Vybrané partie ze silnoprůdové elektrotechniky, skriptum ZČU v Plzni (2002)
- [6] Outter J., Výkonová elektronika pre elektrické pohony, ALFA Bratislava, SNTL Praha (1988)
- [7] Pavelka J., Čerovský Z., Javůrek J., Elektrické pohony, skriptum ČVUT (2001)
- [8] RFD, Usre Guide Dinverter 2B, S/W Version V01.02.01 (1996)
- [9] Sherry A. a kol., Modern Power Station Practice , Volume 4 (Generator and Electrical Plant) (1971)